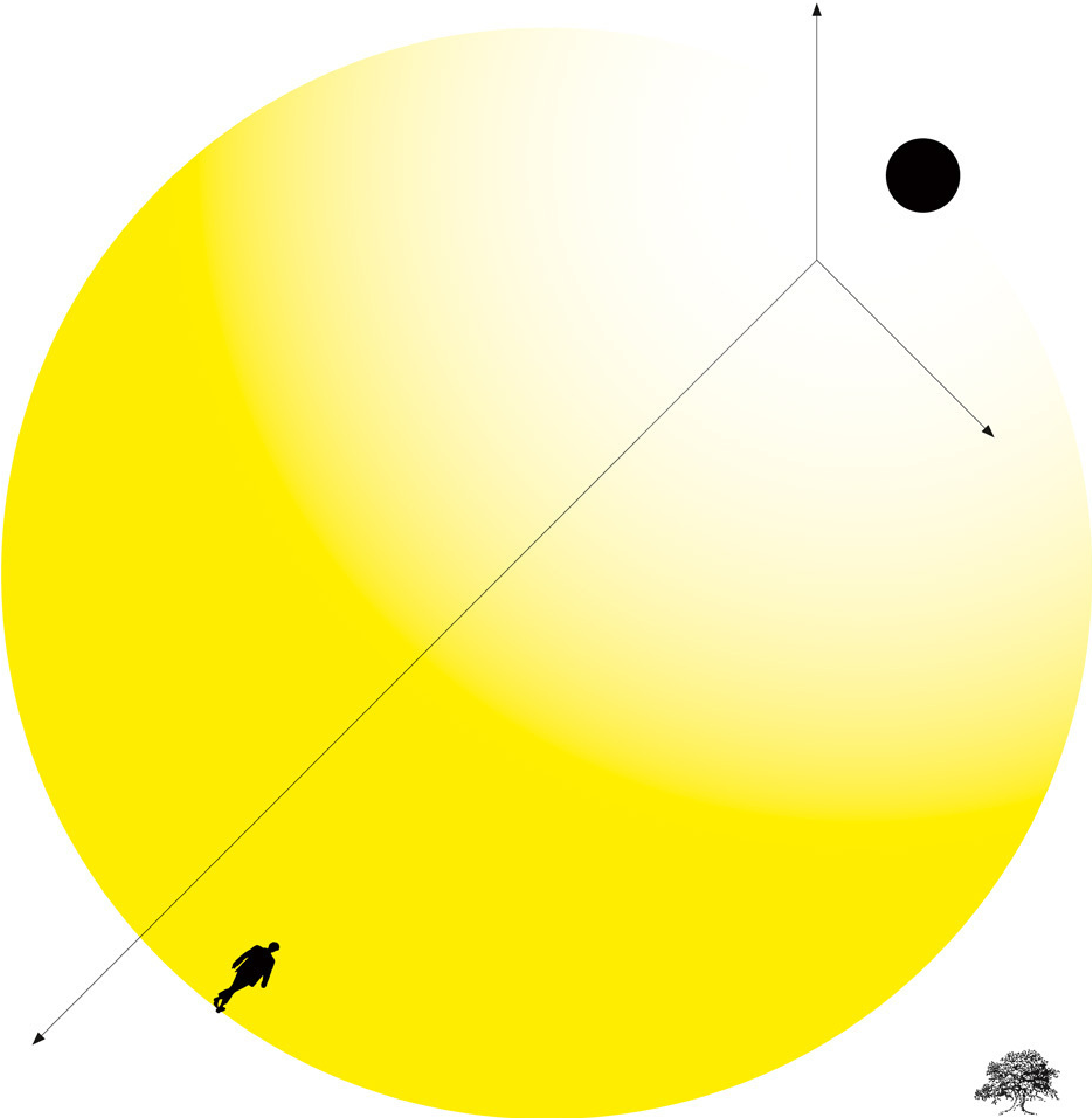
ВСЁ, ЧТО ДВИЖЕТСЯ

ПРОГУЛКИ ПО БЕСПОКОЙНОЙ ВСЕЛЕННОЙ

Алексей Семихатов



от космических орбит до квантовых полей

АНФ
АЛЬПИНА НОН-ФИКШН

Алексей Семихатов

Всё, что движется. Прогулки по беспокойной Вселенной от космических орбит до квантовых полей

«Альпина Диджитал»

2022

Семихатов А.

Всё, что движется. Прогулки по беспокойной Вселенной от космических орбит до квантовых полей / А. Семихатов — «Альпина Диджитал», 2022

ISBN 978-5-00-139803-5

Рассказ о фундаментальной научной картине мира в развитии от более наглядного к более абстрактному: от брошенного камня до объяснения уравнений Эйнштейна и Шрёдингера. Человек разбирается в устройстве Вселенной, наблюдая за движением и его последствиями, догадываясь о правилах, которые регулируют все, что происходит, и получая подсказки о скрытых частях мира или о новых правилах из несоответствий между теоретически ожидаемым и реальным движением: знаменитые примеры включают предсказанное существование Нептуна, Планеты 9 и невидимого вещества в галактиках, причины ускоренного расширения Вселенной, квантовую природу теплового излучения. Привычные способы описания вещей рушатся. Неизбывная вражда, определяемая наличием постоянной Планка, составляет неотъемлемую часть устройства Вселенной. Такое положение дел влияет не только на то, что понимается под движением объектов, но в некоторой степени и на сам характер их существования. Награды и премии Вошла в длинный список XV сезона премии Дмитрия Зимина «Просветитель». В книге обсуждаются функционирование Солнечной системы и возможности путешествий по ней; взаимоотношения пространства, времени и движения в специальной теории относительности и определяемые ими проблемы галактических перелетов; общая теория относительности и ее эффекты, включая некеплеровы орбиты, замедление времени, гравитационные волны и экзотические способы сверхсветового перемещения; энтропия как незнание о микроскопическом движении и ее приложения от тепловых машин до демона Максвелла и черных дыр; квантовая механика, включая прохождение сквозь стены, уникальность устройства атомов, запутанность и интерпретации, призванные

прояснить состояние кошки Шрёдингера. По правилам нашей Вселенной в ней невозможен покой, и читателю предстоит оценить ее беспокойное разнообразие. Мир, где властвует принцип неопределенности, казалось бы, должен выглядеть размытым и неточным, но в действительности все наоборот: мир оказывается чрезвычайно жестким и строгим, а потому точным в отношении тех значений величин, которые все-таки доступны существующим там явлениям. …Перед нами еще один случай, когда отличие времени от пространства вносит свои поправки, и в пространстве-времени обстоятельства поворачиваются таким образом, что самые прямые линии, соединяющие два события, – это самые долгие путешествия для путешествующих. Для кого Для тех, кому хочется найти ориентиры для понимания современной научной картины мира, ее принципов и закономерностей развития.

ISBN 978-5-00-139803-5

Содержание

Алексей Семихатов
Всё, что движется. Прогулки по беспокойной Вселенной от космических орбит до квантовых полей

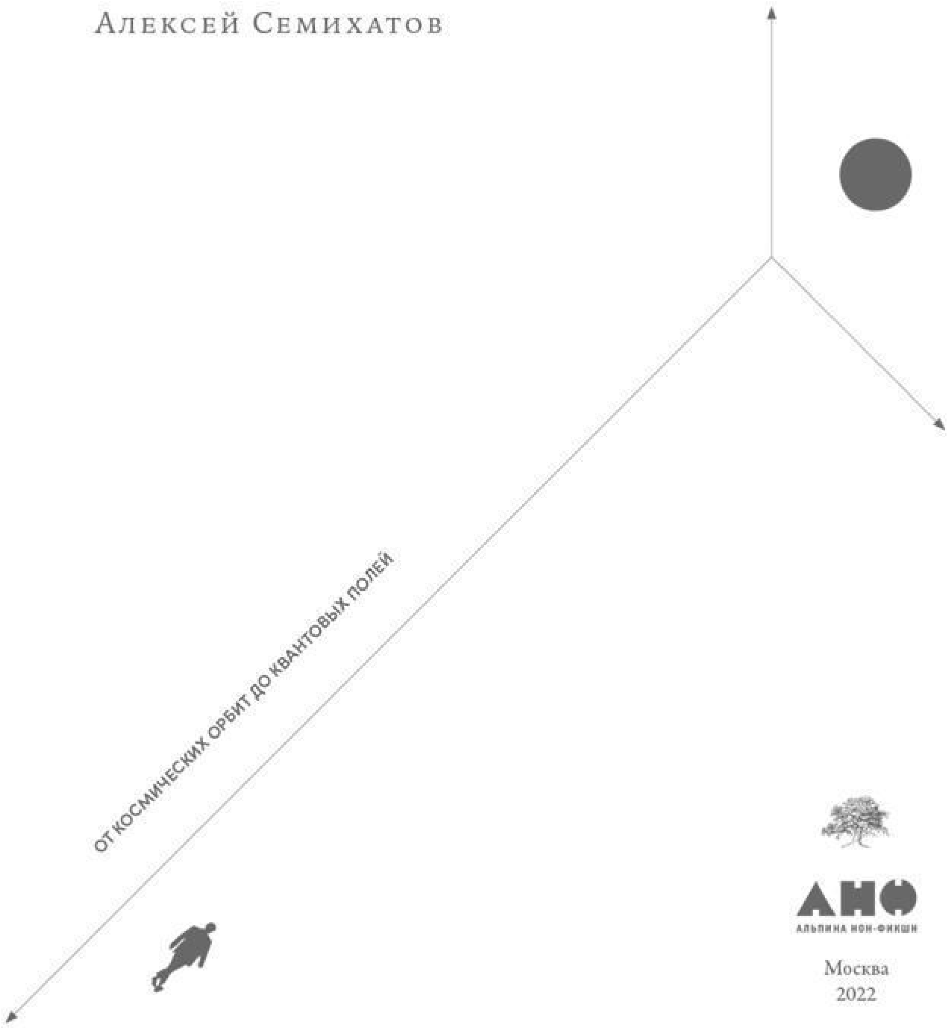
Научные редакторы *Владимир Сурдин, канд. физ.-мат. наук, Сергей Нечаев, д-р физ. – мат. наук*

Редактор *Петр Фаворов*
Издатель *П. Подкосов*
Руководитель проекта *А. Шувалова*
Ассистент редакции *М. Короченская*
Корректоры *Е. Барановская, О. Петрова*
Компьютерная верстка *А. Фоминов*
Художественное оформление и макет *Ю. Буга*
Фоторедактор *П. Марьин*
Иллюстрации *О. Любчанская, П. Марьин*

* * *

ВСЁ, ЧТО ДВИЖЕТСЯ
ПРОГУЛКИ ПО БЕСПОКОЙНОЙ ВСЕЛЕННОЙ

Алексей Семихатов



АНФ
АЛЬПИНА НОН-ФИКШН
Москва
2022

Очень короткое предисловие

О читателе. Эта книга для тех, кому мысли об устройстве мира приносят больше радости, чем расстройства; для тех, кого они скорее интригуют, чем раздражают.

О содержании. Вообще-то самая интересная часть «устройства мира» вокруг нас – это мир людей, но книга не про это, а про то, в чем я понимаю немного больше: про устройство мира неодушевленного, но, впрочем, такого, который сделал возможным появление одушевленного. И интересует меня в этом устройстве, по существу, один-единственный мотив, зато такой, который связан со многими другими. *Вселенная не просто находится в движении, но и в некотором роде существует через движение. В нем соединены пространство, время и материя. Открытие Вселенной началось с изучения движения и во многом продолжается так же: наблюдая за движением одних частей мира, мы делаем выводы о существовании и свойствах других.*

О жанре. Жанр этой книги – *прогулки*. Прежде всего необременительные (хотя кое-где я все-таки переборщил), имеющие своей целью не рассказать обо всем, а скорее заинтересовать чем-то; всегда можно двигаться дальше, но при желании можно и слегка задержаться там, где что-то привлекло внимание[1]. Не возбраняется и еще раз взглянуть на то, что мы уже видели, но с несколько другой стороны. В книге нет ни претензии, ни попытки излагать историю событий, или людей, или даже идей: несистематические исторические экскурсы – это просто элементы прогулки, а для тех, кого мне удалось заинтересовать, – приглашение к самостоятельному углублению в подробности. В ряде случаев подробности (или отступления, с которыми не удалось совладать) приведены в добавлениях к прогулкам. А в поисках читательского внимания я время от времени выношу на поля то, что хотелось бы особенно отметить. Да, и из-за рода моих занятий это прогулки в первую очередь по теоретическому знанию; практика и эксперимент составили бы отдельную книгу. Литературными комментариями в конце каждой прогулки я пользуюсь не только по их прямому назначению, но в ряде случаев и для того, чтобы сознаться в переупрощениях, неиспользовании стандартных терминов и других серьезных прегрешениях.

О дисциплине. Из-за многочисленных и разноуровневых связей идеи движения с другими темами мне следовало держать себя в руках и не отвлекаться на параллельные сюжеты. Полного успеха в таком самоограничении я не достиг. Пожалуй, только предисловие получилось по-настоящему коротким.

[1] Что до некоторой степени оправдывает мою любовь к примечаниям.

Благодарности

По прихоти судьбы – разносчицы даров –
в прекрасный день мне откровенья были.
Я написал роман «Прогулки фраеров»,
и фраера меня благодарили.

Б. Окуджава

Я благодарен времени за то, что оно нашлось. А оглядываясь на это время, я могу только удивляться, как немного сделал я-и-только-я, чтобы эта книга появилась. Первый вариант начальных глав, предвкушая живой отклик, я попросил прочитать Ивана Семенова; он был настолько деликатен, что не только ничего не ответил, но и ни разу впоследствии не дал заподозрить себя в знании, что я хоть что-нибудь написал. Сообразив, что так писать нельзя, я взялся кое-что переделывать – не совсем напрасно, если судить по его же откликам на финальный вариант последних глав. Неоценимыми для меня оказались тренировки по дехаотизации мышления, в которых наряду с другими участвовали Виктория Гинанова, Дмитрий Мамонтов, Василий Панюшкин, Анастасия Решетняк, Валерий Ройзен и Мария Усачева; наши совместные упражнения развивали способность смотреть на вещи, которые я намереваюсь рассказывать, со стороны не рассказчика (т. е. меня самого), а слушателя. Видную роль в качестве этого последнего играл Дмитрий Ликин: он задавал вопросы, а потом отказывался воспринимать мои безнадежно развернутые, *ab ovo*, объяснения, чем поначалу будил негодование в недрах моего «я». Заинтересованной критикой рождающегося текста – критикой, послужившей для меня источником здравомыслия, энергии, решимости и вдохновения, – я обязан Ксении Ануфриевой, Виктории Гинановой, Василию Панюшкину и Марии Попцовой; их замечания и предложения *даже* могли стать причиной заметных улучшений. Алексей Кондратов не только прочитал предварительный вариант (около девяти десятых – что, по-видимому, близко к абсолютному пределу), выказывая при этом удачную комбинацию снисходительности и скептицизма, но и написал блюз «Черная дыра»; возможно, вы уже где-то слышали его исполнение. Сергей Кондратов и Дмитрий Баюк – фактически мои соавторы в двух главах/прогулках (каждый в своей). Кроме более или менее регулярных причин, события, включая и написание книги, могут иметь еще и триггеры, которые косвенно способствуют их реализации; среди тех, кто решительно не ставил себе такой цели, но тем не менее спровоцировал меня на дополнительные усилия (помог, попросту говоря, преодолеть лень), – Ивар Максутов, Максим Карпов, Сергей Серегин, Елена Петровская, Алексей Шилов. Ряд сложных для меня вопросов я обсуждал с Аркадием Цейтлиным и Владимиром Лосяковым; книга, вероятно, была бы лучше, если бы я смог использовать все, о чем они говорили. Я благодарен за разъяснения Алексею Топоренскому и за призывы к стилистической дисциплине Валентину Кориневскому. Интеллектуальные провокации со стороны Михаила Аркадьева помогли мне яснее определить свое позиционирование в пространстве идей. Немало выгоды принесли мне семейные связи: разного рода вопросы и критику я получал от Ксении Семихатовой и ее бабушки (моей мамы) Ирины Красивской. И мне определенно повезло с тем, что предфинальный вариант согласились прочитать Владимир Сурдин и частично Дмитрий Казаков (которые вообще-то являются для меня примером того, как систематически и с вниманием к аудитории рассказывать об устройстве мира). Помимо конкретных исправлений, Сурдин внес несколько предложений, которые я беззастенчиво использовал, не всегда это оговаривая. Я благодарен моему издателю Павлу Подкосову за приглашение, содержавшее в себе не только мотивированный отказ издавать книгу наспех, но

и предложение вместо этого подготовить издание с командой «лучших людей», по его выражению. Это предложение имело последствия, включая положительные: многими фрагментами, где мой слог попадает в интервал от приемлемого и выше, я обязан редактору этой книги Петру Фаворову. Он, правда, и не думал ограничиваться слогом и стилем, а принялся методически изводить меня пожеланиями, плавно переходящими в требования, внести смысл туда, где его наличие вызывало у него сомнения (совершенно обоснованные, как я раз за разом убеждался). Под его неослабным давлением пришлось сделать то, что обычно бывает при подготовке второго издания, если книга удостаивается такого отличия: исправить глупости и разобраться с немалым числом неоднозначных и путаных формулировок, временами граничивших с ошибками. Одним словом, я бессовестно сел на шею Фаворову, сделавшему для создания новой версии ничуть не меньше меня, и в результате читателю уже сейчас фактически предлагается второе, «дополненное, исправленное и существенно переработанное» издание. (Первое, благо было в дюжине экземпляров, быстро разошлось.) Последующее научное редактирование, за которое неожиданно согласился взяться Сергей Нечаев, имело благотворные результаты в виде освежающей критики и сопутствующей ей расстановки смысловых точек над «i», включая такие, о существовании которых я ранее и не подозревал; в результате я открыл для себя новые связи между вещами, а в тексте появилось несколько уточняющих и дополняющих пояснений. Помимо всех этих «непосредственных» факторов, неоспоримо влияние, которое на меня оказали полтора десятка лет развития отношений с книгами того сорта, к которому я надеюсь присоединить и эту: благодаря Д. Б. Зимину (1933–2021) я имел обязанность и привилегию каждый год читать две дюжины книг о науке для широкого читателя, а затем – удовольствие обсуждать их в компании заинтересованных людей, которым Зимин доверил ту же задачу и к которым со страстью присоединялся (наряду со многим другим, что он делал для поддержания читающей, интересующейся, думающей среды). А прочитанные при этом книги оставили мне лишь небольшую незанятую область в гиперпространстве смыслов, из-за чего я начисто избежал мучительных раздумий, про что же писать.

И при всей благосклонности судьбы, которую она, возможно, проявляла по сей момент к этому замыслу, она не смогла бы помочь мне без постоянной вдохновенной и вдохновляющей поддержки моей жены Наташи.

Часть 1
Космические прогулки

Прогулка 1
Движение по правилам

Маршрут: *От качества к количеству. – Открытие Солнечной системы. – Относительность и инерция. – Законы движения. – Всеобщее притяжение. – Уравнения движения. – Больше чем Кеплер. – Движение как организация.*

Главный герой: *Иоганн Кеплер*

От качества к количеству. Планеты – т. е. *блуждающие* среди звезд – сопровождали человечество со времени первых сколько-нибудь раздумчивых взглядов в ночное небо. Вид этого неба с тех пор несколько изменился, хотя и не сильно, но наша острота взгляда и способность делать выводы из наблюдений развились фантастически – хотя сказать так, пожалуй, является даже умалением. Процесс начал самоускоряться, когда от наблюдения за движением планет и вещей мысль обратилась к причинам движения; от констатации наблюдаемого – к предсказаниям того, какое движение должно наблюдаться. Сейчас на основе всего достигнутого нашей научно-технической цивилизацией мы в огромной мере разделяем уверенность, что искать фундаментальные причины и формулировать законы природы – предприятие не просто осмысленное, но и чрезвычайно полезное и что Вселенная познаваема, по крайней мере до некоторой степени. Но легко рассуждать задним числом, стоя на плечах гигантов. Греки были лишены подобной привилегии, и у них, по-видимому, не было ясного представления о таких законах: они не сформулировали четкого закона движения, например, для выпущенной из лука стрелы. Тела падают, потому что их место – на земле, и к этой «цели» все они и стремятся. Наблюдения над поведением вещей подытоживались рассуждениями Аристотеля, который различал «естественное движение», т. е. движение к естественному состоянию, и «насильственное движение», т. е. происходящее против естества (а для объяснения сложных случаев, таких как стрела, которая все же летит некоторое время вверх, хотя естественное место ее на земле, потребовалось и «смешанное движение»).

С нашим современным умением пользоваться законами природы и представлением, что они действуют «через причины», довольно трудно принять античную точку зрения, искавшую закономерности в математическом мире, но не предполагавшую их неотвратимого и однозначного действия в мире физическом. Согласно Аристотелю, движение вообще невозможно описывать математически и изучение природы – «физика» – может строиться только качественно; сама идея приписывать качествам какую-то численную меру появилась только в Средние века. Но что же и потом довольно долго мешало разглядеть, что стрела летит по математически строгой траектории, называемой параболой? Среди прочего – тот простой факт, что стрела *не* летит по параболе. Сопротивление воздуха «портит» параболу и превращает ее во что-то сложное – почти буквально «смешанное». В реально наблюдаемых нами процессах многие факторы *путаются*. Чтобы сформулировать принципы, которыми управляется происходящее, часто (да почти всегда) требуется отделить одно от другого (и от третьего, и от четвертого – влияний разного рода, как правило, много). В целом ряде сложных явлений мы сумели разобраться, выделив в них несколько факторов, каждый из которых действует относительно просто, и поняв, как эти разные факторы влияют друг на друга. Ключевая идея, таким образом, состоит в том, что некоторый главный эффект может до некоторой степени «портиться» всяческими дополнительными влияниями. Но, чтобы увидеть главный эффект во всей его полноте и строгости, иногда требуется проделать работу по реальному или воображаемому устранению этих влияний. Идеальные проявления законов природы могут поэтому оказаться абстракцией, но такие абстракции доказали свою полезность в практическом плане. Да, тело, запущенное под углом к горизонту, не летит по математически строгой параболе; но любой артиллерийский офицер эпохи Наполеоновских войн сказал бы, что пользы от «нереализуемой» параболы все равно много: она математически точна и проста, и, хотя она дает лишь некоторое приближение к реальности, для учета сопротивления воздуха в разных обстоятельствах и других эффектов имеются таблицы поправок при прицеливании. Такой подход к описанию реальности (заметно отличный от аристотелевского) колоссально расширил наше понимание Вселенной[2].

****

Открытие Солнечной системы. Впечатляющий шаг к ключевой идее, что законы мироустройства *можно* извлечь из наблюдений, был сделан при рассмотрении «идеального», как все еще казалось тогда, мира небесных тел и потребовал точных наблюдений планет на небе. Их выполнил в последней трети XVI в. Тихо Браге, происходивший, как бы теперь сказали, «из олигархов», что (нисколько не умаляя его приверженности точным и систематическим наблюдениям) способствовало наличию у него лучших из имевшихся тогда – до изобретения телескопа! – приборов. К составленным им таблицам с данными наблюдений в конце концов получил доступ сильно желавший этого Иоганн Кеплер – человек определенно не аристократического происхождения, упорство и гениальность которого в итоге превратили колонки чисел в математические кривые. Орбиты планет, как смог усмотреть из таблиц Кеплер, представляли собой эллипсы, причем Солнце располагалось вовсе не в центре, а несколько в стороне, в одном из двух фокусов (рис. 1.1); картина не очень симметричная, потому что во втором фокусе ничего нет.

[2] Никто, конечно, не отменял сложные явления, в которых задействовано несколько ключевых механизмов сразу, из-за чего не получается построить картину происходящего, начав с какого-то одного из них. В подобных случаях нам все-таки приходится оперировать современными вариантами рассуждений о «смешанном» поведении. – *Здесь и далее примечания автора, если не указано иное.*

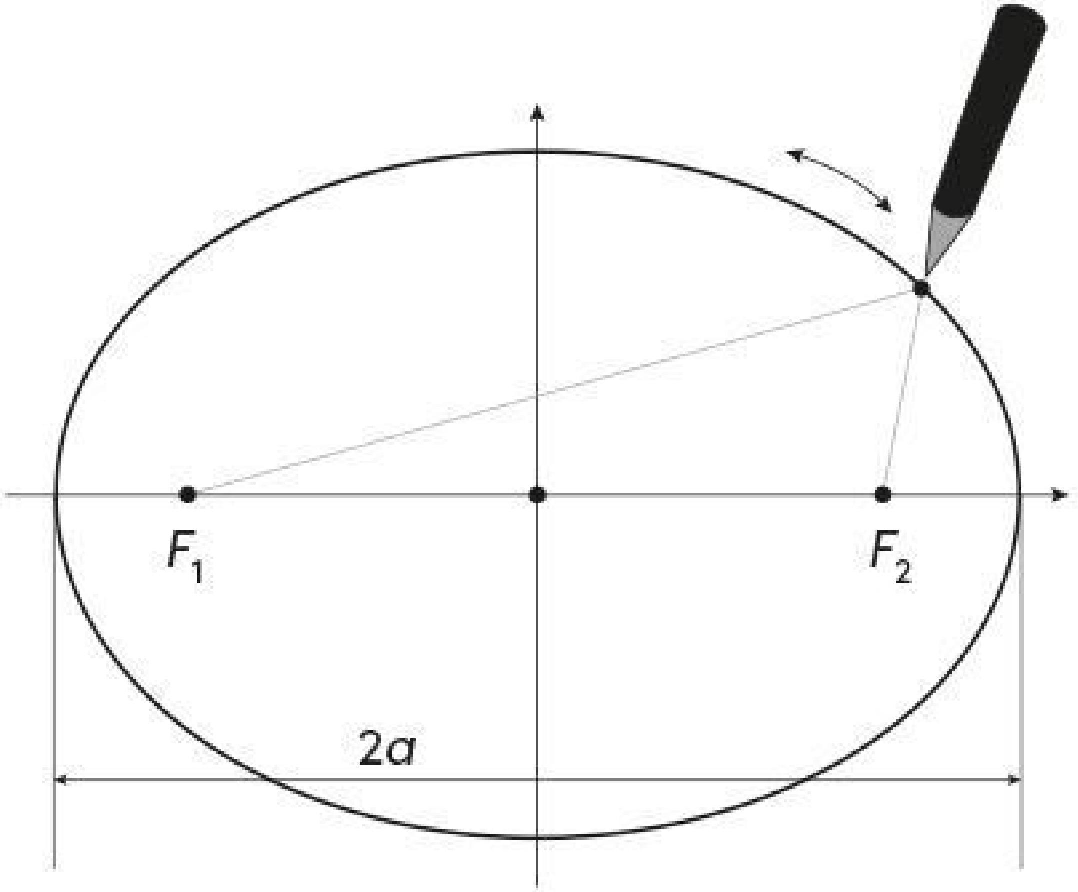


Рис. 1.1. Эллипс интереснее окружности. Он определен тем, что сумма расстояний от каждой его точки до двух фиксированных точек (фокусов) постоянна. Поэтому нарисовать эллипс проще всего, закрепив в этих точках концы нитки и держа карандаш так, чтобы нитка всегда была натянута. Показано расстояние $2a$ между двумя самыми удаленными друг от друга точками эллипса. Его половина, a, называется большой полуосью

Космический телескоп, запущенный в 2009 г. и вооруженный самыми современными технологиями для поиска планет у других звезд (иначе говоря, экзопланет), получил имя «Кеплер». При этом в мире Иоганна Кеплера звезды были огнями на самой дальней из твердых сфер – какие уж там планеты! – и даже в том, что касается Солнечной системы, он и не подозревал о существовании Урана и Нептуна. И уж тем более там не было места рукотворным изделиям, отправленным путешествовать теми же путями, что планеты. Подходящее ли это название для космического телескопа?

Задача, которую решал Кеплер в первые годы XVII в., – найти форму (и относительные размеры) орбиты каждой из планет – осложнялась тем, что наблюдения за движущимися планетами велись с Земли, которая сама тоже двигалась каким-то образом (как одна из планет, должен был рассуждать Кеплер; но *как именно*? Заранее неизвестное движение Земли требовалось некоторым образом «вычесть» из результатов наблюдений). В этом смысле таблицы Тихо Браге носили несколько «внутренний» характер, как если бы Аристотелю были доступны только видео летящей стрелы, снятые с других стрел. И даже хуже того: наблюдаемые «положения» планет – это не их положения в пространстве, пусть и относительно Земли, а только *направления* на эти их положения в пространстве. И на небе они ведут себя не самым регулярным образом, время от времени меняя направление своего перемещения на фоне звезд (рис. 1.2). Ответ же, данный Кеплером на вопрос о движении вокруг Солнца всех планет, включая и Землю, носит совершенно «внешний» характер: мы вслед за Кеплером рисуем эллипсы так, как будто видим Солнечную систему со стороны. По сей день ни один наблюдатель, ни один беспилотный космический корабль не смотрел на Солнечную систему извне, чтобы в течение достаточно долгого времени – скажем, пары десятков лет – *как на картинке* удостовериться, что планеты вычерчивают эллипсы. И тем не менее в этом нет ни малейших сомнений. Я с трудом могу вообразить, как такой взлет мысли – переход от «внутренней» перспективы к «внешней», казалось бы немыслимой в век, когда и Земля-то не вся была исследована, – вообще мог произойти в голове отдельно взятого человека в 1600–1609 гг.[3] Словами Эйнштейна:

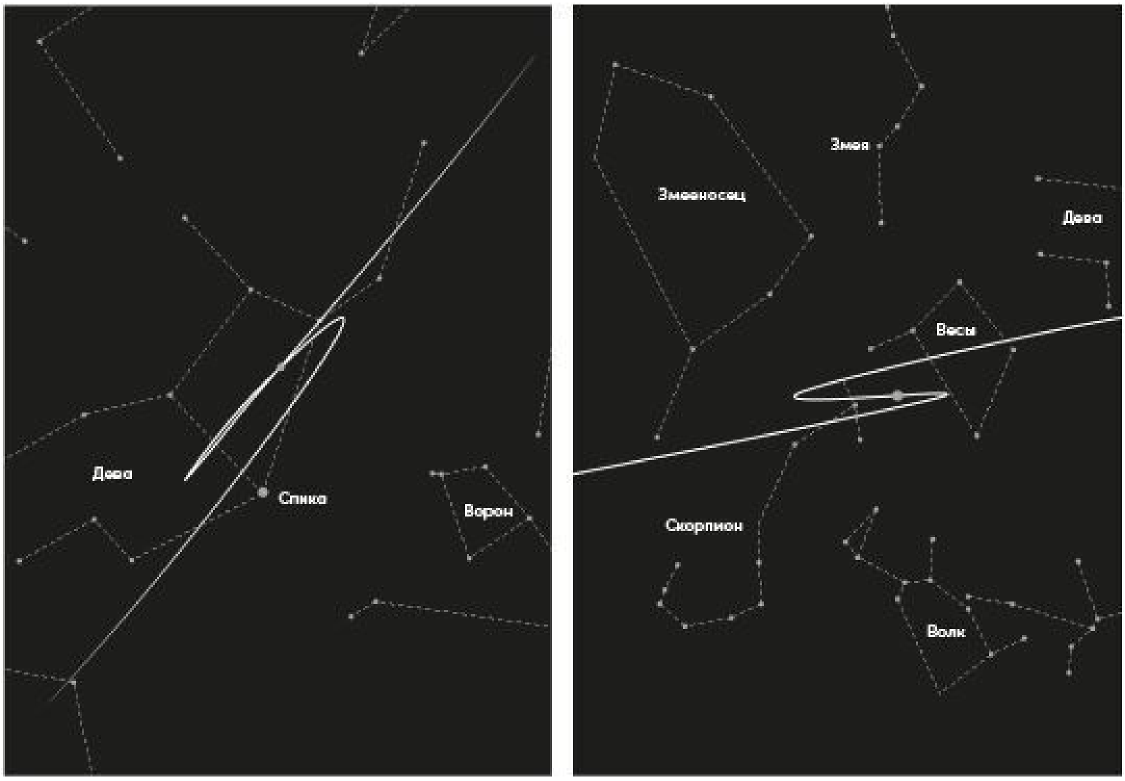


Рис. 1.2. Два фрагмента пути, по которому Марс движется на небе

> Он жил в эпоху, когда не было еще уверенности в существовании некоторой общей закономерности для всех явлений природы. Какой глубокой была у него вера в такую закономерность, если, работая в одиночестве, никем не поддерживаемый и мало понятый, он на протяжении многих десятков лет черпал в ней силы для трудного и кропотливого эмпирического исследования движения планет и математических законов этого движения![4]

Больше того, Кеплер жил в эпоху, когда ему в течение нескольких лет приходилось всерьез заниматься защитой своей матери от обвинений в колдовстве; женщине реально грозил костер.

Кеплер сформулировал три высказывания. Они известны как три закона Кеплера.

1. **Про эллипсы как таковые.** Орбиты – эллипсы; Солнце – в одном из фокусов. Это был грандиозный успех, превращение наблюдений – сырых данных о движении планет по небу – в математическое высказывание и одновременно с этим колоссальный прорыв в соот-

---

[3] Кеплерова «Новая астрономия» (Astronomia Nova) вышла в 1609 г. Впрочем, все три закона, о которых речь чуть ниже, обрели свою окончательную форму ближе к 1621 г.

[4] Пер. А. М. Френка.

несении наших представлений об идеальном с реальностью. Ведь вполне естественно было думать, что «природа предпочитает совершенство» в виде сфер и круговых орбит, с Солнцем в центре, но, во-первых, Кеплер понял, что это не так, а во-вторых, сумел показать, как же все происходит на самом деле, причем это второе – с математической точностью (окружность – частный случай эллипса; в этом смысле орбиты могли бы быть и круговыми, просто они такими не оказались).

2. **Про скорость движения по этим эллипсам.** Она, оказывается, не постоянная. Кеплеру принадлежит ясная формулировка, из которой следует, в какой части эллипса планета движется быстрее и в точности во сколько раз быстрее, чем в какой-нибудь другой части. Закон так закон! – ему следуют *все* планеты, включая Землю. Чтобы его сформулировать, Кеплер снова приглашает нас посмотреть на орбиты со стороны и делает геометрические построения, проводя воображаемую линию от Солнца к планете и рассуждая о том, как эта линия поворачивается. Это довольно удивительно, если учесть, что никакой такой «линии» нет, но математические рассуждения с ее использованием позволяют сформулировать правило, описывающее реальные движения всех планет. Сравнивая положение планеты на орбите «сейчас» и, скажем, через день, Кеплер просит нас обратить внимание на площадь фигуры, образованной двумя радиусами и участком орбиты, который планета прошла за день. Второй закон Кеплера состоит в том, что *площадь* такого треугольника, заметаемого за выбранное время (скажем, день), – одна и та же вдоль всей орбиты. Там, где планета ближе к Солнцу, она движется как раз настолько быстрее, чтобы скомпенсировать меньшую высоту треугольника (расстояние от Солнца). Разница в скоростях вблизи Солнца и вдали от него велика для вытянутых эллипсов; для Земли же максимальная и минимальная скорости составляют 30,29 км/с и 29,29 км/с (соответствующие расстояния до Солнца при этом 147,09 млн и 152,10 млн километров). Земля ближе к Солнцу и движется быстрее, когда в Северном полушарии осень и зима, из-за чего этот прекрасный сезон формально оказывается укороченным на несколько дней. (Пять миллионов километров ближе или дальше от Солнца – далеко не первостепенный фактор, влияющий на климат.)

3. **Про то, как размеры эллипсов, по которым движутся разные планеты, соотносятся с временем их полного оборота вокруг Солнца.** Не только каждая планета сама по себе следует законам, но и каждая пара планет подчиняется строгой и одной для всех математике. «Размером» эллипса в данном случае является его большая полуось – расстояние от *центра* (а не от Солнца!) до точки наибольшего удаления. Для любой пары планет Кеплер предлагает поделить друг на друга их большие полуоси, а результат возвести в квадрат. В качестве второго действия нужно поделить друг на друга продолжительности года на каждой планете, а результат этого деления возвести в куб. Получится, говорит Кеплер, одно и то же. Чем дальше планета от Солнца, тем больше времени занимает ее полный оборот – не *только* из-за того, что орбита длиннее, но *еще и* из-за того, что скорость планеты меньше (в 4 раза дальше – в 8 раз дольше; в 9 раз дальше – в 27 раз дольше).

Кеплер начал с определения формы орбиты Земли, потом это сильно облегчило ему задачу найти форму всех других орбит. Но как же было подступиться к орбите тела, *с которого* были сделаны все наблюдения? Понадобилось третье, кроме Земли и Солнца, тело, а именно – Марс. Но, поскольку орбита Марса была равным образом неизвестна, Кеплер использовал его как источник некоторого набора отдельных точек («дискретной» информации). Ключ – момент, когда Солнце, Земля и Марс оказались на одной прямой. (Такое положение трех тел *случается* с неплохой точностью, потому что орбиты Земли и Марса лежат почти в одной плоскости; Земля при этом совершает один оборот вокруг Солнца быстрее, чем Марс.) Направление этой прямой относительно звезд следовало зафиксировать; оно сыграет «опорную» роль. А далее – вот источник дискретности в применяемой схеме! – требовалось знать продолжительность марсианского года (это отдельный вопрос, ответ на который у Кеплера был). Через один марсианский год Марс окажется снова на той же прямой, но Земля нет. Для наблюдателя с Земли Марс и Солнце будут видны под некоторым углом друг к другу. Этот угол, который можно непосредственно измерить, – полдела. Вторая половина – это линия «Солнце – Земля» в этот же момент: необходимо определить ее направление относительно звезд, что позволит найти угол, который она образует с «опорным» направлением. Принимая расстояние от Солнца до Марса в «опорном» положении за единицу, находим треугольник по стороне и двум углам. Мы определили (!) точку на земной орбите. После этого все вычисления *надо повторить*, найдя в таблице положение Марса и Солнца относительно звезд еще один марсианский год спустя, и еще один и так далее. Каждый раз таким образом появляется по точке; Кеплер сумел уложить все эти точки на слабо вытянутый эллипс (*не* поддавшись искушению заявить о круговой орбите в пределах точности вычислений!). Когда орбиты всех планет были найдены, настала очередь следующей задачи – угадывать законы *движения* планет по этим орбитам. Это означало делать какие-то допущения (с каких начать?!), проверять их, определяя с помощью таблиц пространственное положение планет в разные моменты времени, и если допущения не подтверждались, то придумывать и проверять другие. Перед нами одинокий человек в окружении пустоты и сферы звезд, вооруженный числовыми таблицами данных и одержимый страстным желанием своими силами разобраться в устройстве известного ему мира.

Кеплер не открыл для нас планеты – они были известны с доисторических времен. Но он в некотором роде открыл для нас Солнечную систему, показав, какова в ней *система* – какой порядок там действует. Сейчас все предсказания, скажем, взаимного расположения Земли и Марса, необходимые для планирования путешествий между ними, математически делаются на основе тех самых кеплеровых эллипсов (хотя и требуют на фоне главного эффекта учитывать ряд дополнительных факторов, с которыми у нас будет еще немало поводов познакомиться). Про орбиты планет, да и не только планет, часто говорят «кеплеровы». Космический телескоп «Кеплер» проработал (не без приключений) до 2018 г., исследовав в общей сложности 530 506 звезд и открыв 2662 экзопланеты. Небольшая выборка экзопланет, сравнимых с Землей по размеру и находящихся в зоне обитаемости[5], приведена на рис. 1.3. Поиск таких объектов заведомо невозможен без знания о том, что искомые планеты – о существовании которых Иоганн Кеплер не мог и помыслить – движутся вокруг своих звезд по кеплеровым орбитам. По-моему, «Кеплер» – подходящее название для такого телескопа.

Рис. 1.3. Земля и несколько экзопланет. Данные им названия отражают тот факт, что они открыты с помощью космического телескопа «Кеплер»

[5] То есть на таком удалении от светила, при котором на планете не слишком холодно и не слишком жарко, так что там может существовать вода в жидкой фазе при не слишком высоком давлении.

*****

Относительность и инерция. Современник Кеплера Галилей *не* бросал предметы с колокольни на Кампо-деи-Мираколи в Пизе, за возможным исключением незадокументированных случаев баловства[6]. Галилей первым всерьез направил телескопическую трубу в небо и совершил революционные открытия (включая спутники Юпитера, кольца Сатурна, горы на Луне, пятна на Солнце и фазы Венеры); однако среди тех многочисленных вещей, которые он постоянно был готов обдумывать, предметом его долгосрочного интереса было движение.

Для нас важны два глубоких свойства движения, осознание которых началось с Галилея: относительность и инерция. Галилей усматривает их в природе вещей с помощью того, что ему неизменно удавалось с блеском: он извлекает «идеальные» следствия не из идеальных, а вполне реальных опытов, а также применяет логический анализ путем постановки *мысленных* экспериментов. Успехи в таком подходе к исследованию природы, собственно говоря, и снискали ему титул основоположника научного метода (что, впрочем, известно нам сейчас, но не было известно ему самому). Если художник рисует натуру, находясь вместе с ней в каюте на корабле, который плавает в виду берега, то при *идеальном* состоянии моря, рассуждает Галилей, художник может забыть, что он находится не на берегу, а на корабле; ничто не будет мешать созданию картины. Но на взгляд людей, стоящих на берегу, рука художника участвует в движении, включающем движение самого корабля. Следовательно, если корабль не качается и не дергается, его движение не оказывает никакого влияния на происходящее в каюте. Отсюда происходят две идеи: одну впоследствии стали называть принципом относительности, а другая, важная для Галилея (и неизменно важная с тех пор), – независимость движений, т. е. движение кисти относительно холста и движение холста относительно берега независимы. Развивая именно этот тезис, Галилей стал первым, кто теоретически *получил параболу* для «стрелы» (тела, брошенного под углом к горизонту). Исходя из того, что горизонтальное и вертикальное движения независимы, он замечает, что горизонтальное движение равномерно, а вертикальное ускоренно; их сложение и дает параболу – вывод, который Галилей считал одним из главных результатов своей теории движения.

Галилею принадлежит и сама идея равноускоренного падения, причем одинакового для всех тел[7]. Доминировавшая до того точка зрения опиралась на представление о естественности равномерного движения; это, по-видимому, должно было означать, что после разжатия руки яблоко сразу приобретает ту скорость, с которой ударится о землю. Исходный же пункт рассуждений Галилея состоял в том, что падающие тела, когда им «ничто не мешает» (что тоже не так просто организовать), изменяют скорость по мере того, как падают. Но *как* меняется скорость? Галилей установил, что скорость увеличивается в течение всего падения и что тело последовательно проходит «через все градусы скорости» (этот подход, существенно расходящийся со взглядами Аристотеля, присутствует уже здесь, хотя и не принадлежит лично Галилею: приписывать качествам определенные «градусы» – не античная, а средневековая идея). Довольно долго он думал, что скорость увеличивается равными порциями через равные отрезки пути, но потом логическими рассуждениями отверг эту идею, а вместо этого показал, что скорость растет равными порциями за равные промежутки времени – пропорционально времени, как мы бы сейчас сказали. Я часто напоминаю себе, что все это происходило в отсутствие часов, хоть сколько-нибудь пригодных для точных измерений, и – что, может быть, даже более важно –

---

[6] Этот эпизод придумал Винченцо Вивиани для первой официальной биографии Галилея, которую он сочинял по заказу великого герцога Тосканского, ориентируясь на пример «Жизнеописаний» Вазари; духу Вазари эта история действительно вполне соответствует.

[7] Последнее обстоятельство, как выяснилось впоследствии, может служить проводником глубоко в природу мира, и на дальнейших прогулках нам предстоит познакомиться с впечатляющим развитием событий.

до *формализации понятия ускорения*[8]. Три с половиной столетия спустя, 2 августа 1971 г., командир «Аполлона-15» Дейв Скотт, стоя на поверхности Луны перед своим лунным модулем, произнес, глядя в камеру:

> Вот в левой руке у меня перо, а в правой – молоток. И можно сказать, что одной из причин, по которой мы сюда добрались, был джентльмен по имени Галилео, живший очень давно, который сделал довольно существенное открытие о падающих телах в гравитационных полях. И мы подумали: где найти лучшее место, чтобы подтвердить его результаты, как не на Луне? Так что мы решили, что попробуем это вам сейчас показать. ‹…› Я отпущу оба предмета, и, будем надеяться, они достигнут поверхности одновременно.
>
> [*Он разжимает перчатки – молоток и соколиное перо падают на лунную поверхность в согласии с ожиданиями.*]
>
> Как вам такое?!

Справедливости ради надо сказать, что Галилей развивал не идею притяжения, а тезис о *естественности* равноускоренного движения; тем не менее одинаковое ускорение для всех падающих тел в отсутствие сопротивления воздуха – его открытие.

> Как тебе такое, Галилео Галилей?

Кроме того, Галилей смог усмотреть в свойствах движения то, что позднее стали называть инерцией (склонность движущихся тел сохранять свое состояние движения или в частном случае – покоя), хотя слова «инерция» сам Галилей не употребляет. Свойство *каждого* тела двигаться по инерции не вполне очевидно на первый взгляд, потому что мы воспринимаем разные свойства вещей одновременно: тела вокруг нас *не* сохраняют состояние своего движения из-за того, что на них действует сила трения или сила сопротивления среды. Не зная заранее всех действующих здесь факторов, не так легко выделить свойство инерции и объяснить, как оно проявляет себя, когда других факторов нет. Здесь снова в полной мере потребовалась способность Галилея логически доводить постановку эксперимента до некоторого предела – скажем, предела исчезновения трения, – добиться которого в реальности невозможно, но свойства которого тем не менее делались ясными исходя из шагов, приближающих реальную постановку к идеальной.

Галилею же принадлежит мысль, что книга природы написана языком математики:

> Я распознал у Сарси твердое убеждение в том, будто при философствовании необычайно важно опираться на мнение какого-нибудь знаменитого автора ‹…› В действительности же, синьор Сарси, все обстоит не так. Философия написана в величественной книге (я имею в виду Вселенную), которая постоянно открыта нашему взору, но понять ее может лишь тот, кто сначала научится постигать ее язык и толковать знаки, которыми она написана. Написана же она на языке математики, и знаки ее – треугольники, круги и другие геометрические фигуры, без которых человек не смог бы понять в ней ни единого слова; без них он был бы обречен блуждать в потемках по лабиринту[9].

Вопрос о том, *почему* математика настолько эффективна в естественных науках, обсуждался многократно, и простого ответа на него нет, но рассуждения и примеры, приводимые различными авторами, читать интересно. Как бы то ни было, математика снабжает нас «движ-

---

[8] Галилею удалось выразить закон равноускоренного движения («естественно ускоренного», в его трактовке), не вводя никакой количественной меры для ускорения; собственно говоря, при естественно ускоренном движении тело проходит все градусы скорости, но никаких градусов ускорения нет.

[9] Пер. Ю. А. Данилова.

ком» для того, чтобы делать выводы. Она особенно ценна в этом качестве, когда мы выходим за пределы области, где помощником может служить «здравый смысл». Это набор представлений, выработанных в рамках нашего ограниченного опыта, и они вполне могут отказывать (и отказывают!), когда этот опыт расширяется. Как следствие такого положения вещей математика скрыто присутствует почти везде на этих прогулках.

****

Законы движения. Но почему три закона Кеплера таковы? Почему Солнце в фокусе? Почему планеты движутся именно так?

Ответ на каждое «почему» должен опираться на нечто, что принимается без объяснения, иначе никакое объяснение не останавливается и поэтому перестает быть объяснением. Ответы, которые удается дать довольно близко к тому уровню, где уже приходится разводить руками, называются фундаментальными. В момент формулировки законов Кеплера они сами, вероятно, считались бы фундаментальными, реши тогда кто-нибудь классифицировать подобные утверждения таким образом. Как-никак эти законы были приложимы ко всем известным планетам. Но 80 лет спустя уже нельзя было так думать, потому что фундаментальными оказались другие законы – Ньютона[10]. И это были законы совсем другого сорта. Из них следовало *множество* утверждений, включая и эллипс для планеты, и параболу для стрелы, не испытывающей сопротивления воздуха (и заодно – направление мысли, позволяющее как-то учесть это сопротивление). События начали разворачиваться стремительно, потому что фокус внимания сместился на *причины*.

Причины наблюдаемых движений Ньютон сформулировал в виде *законов движения* – утверждений совсем иного свойства, чем законы Кеплера. Законы Ньютона напрямую ничего не говорили о том, по какой траектории полетит стрела или планета! Вместо этого они предлагали всем заинтересованным лицам действовать более прогрессивным образом: определить траектории самостоятельно (!) на основе буквально нескольких принципов. Ключевой аспект всей схемы – универсальность этих принципов. Их меньше, чем пальцев на руке, но их можно применять снова и снова – и к явлениям уже известным, и к тем, которые могут нам встретиться когда-нибудь в будущем. Это довольно удивительно: ничем не похожие явления *подчиняются* одним и тем же общим принципам. Слово «принципы» здесь надо понимать в первую очередь как *уравнения*. Это не уравнения типа $x^3 + 3x^2 + 3x - 1 = 0$, решением которых могут являться числа (например, как в данном случае, число, примерно равное 0,259921); вместо чисел неизвестным тут является *поведение*, или, чуть более технически, траектории. Всякое движущееся тело с течением времени описывает траекторию, и предложенная Ньютоном схема сводилась к поиску того, какова эта траектория, т. е. как именно координаты чего-то движущегося зависят от времени. Входные данные для этого состоят в воздействиях, которым подвергается то, что движется, – планета, или стрела, или что угодно. Выражаясь еще чуть более технически, требовалось решить уравнения, где неизвестными вместо чисел были зависимости от времени – функции. Слово «функция» в таком контексте означает не набор обязанностей, а именно характер зависимости: если ваш вклад в банке – возрастающая функция времени, это значит, что сегодня у вас больше денег, чем вчера; иногда становятся интересны и другие подробности, например, *сколь быстро* эта функция времени растет, меняется ли сама скорость роста и т. д.[11] Все то же самое можно спрашивать и про разные другие функции. Скорость

---

[10] Ньютоновы «Начала» (Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica) вышли в 1687 г.

[11] Тема, привлекающая к себе неослабевающее внимание: а каким уравнениям подчиняются функции, определяющие доходность финансовых инструментов? Сама постановка этой задачи навеяна успехом стратегии «выразим наши представления о причинах в виде уравнений, а потом будем их решать».

самолета, разгоняющегося на взлетно-посадочной полосе, – тоже функция времени, и важная часть истории состоит в том, через какое время скорость достигнет значения, обеспечивающего отрыв от земли. Чтобы узнать это, необходимо понять причины.

Прежде всего, говорит нам Ньютон, движение «сохраняется», если то, что движется, предоставить самому себе, т. е. никак не воздействовать на него со стороны. Это факт, понятый уже Галилеем; Ньютон определенно действовал не на пустом месте[12]. В воздушном хоккее шайба продолжает двигаться туда, куда вы ее направили, пока не испытает воздействия еще какого-то предмета (бортика или биты). Умение забивать голы в этой игре состоит в том, чтобы привести шайбу в движение устраивающим вас образом – *направить* ее в ворота, и после этого *ничего больше делать не надо*, потому что от вас уже ничего не зависит, пока шайба не испытает какое-то следующее воздействие, из-за которого изменит свое движение; в промежутке же она движется «сама», причем по прямой и с заданной скоростью[13]. В этом и состоит «сохранение движения» в отсутствие сил, оно же – закон инерции Галилея, и оно же – первый закон Ньютона. У инертности есть количественная мера: это масса.

Итак, если не воздействовать, то движение сохраняется. Как только этот факт полностью осознан, естественно предположить, что если как-то воздействовать, то движение изменится. Осталось только сказать *как*, и Ньютон примерно это и говорит, но только не вполне прямо, потому что природа отвечает на этот вопрос не прямо, а косвенно. Чтобы высказываться точнее, нам понадобятся средства. Одно из них – *количество движения*. Оно тем больше, чем быстрее нечто движется и чем больше его масса. Грузовик, весящий 10 тонн и движущийся со скоростью 30 км/ч, имеет то же количество движения, что и автомобиль весом 2 тонны на скорости 150 км/ч. Количество движения – это просто произведение массы на скорость, с тем только уточнением, что, кроме величины, оно имеет еще и направление – такое же, как у скорости; в общем, как и скорость, это *стрелка* (вектор). Когда говорят о сохранении (неизменности) таких стрелок, это означает, что не меняется ни их длина, ни направление (шайба в воздушном хоккее летит по прямой, пока на что-нибудь не натолкнется), а *изменить* стрелку означает изменить ее длину или направление (или и то и другое).

Высказывание, что движение сохраняется, в точной формулировке звучит как «количество движения сохраняется» в отсутствие внешних воздействий (сил). Если же какие-то силы действуют, то количество движения меняется, и, главное, меняется быстро или медленно в зависимости от того, велика ли сила. У каждого изменения есть свой темп (если это не приводит к недоразумениям, можно говорить «скорость изменения»). И вот *темп изменения* количества движения как раз равен полной действующей силе, сообщает нам Ньютон. Просто *равен*. Нет никакой возможности сосчитать, сколько раз это высказывание применялось для описания мира. В нем содержится указание на причину: это сила. Сила тяги двигателей самолета, разгоняющегося для взлета, определяет, как быстро меняется количество движения самолета – что в салоне ощущается как эффект прижимания к спинке кресла; в горизонтальном направлении на самолет действуют еще и силы сопротивления (рис. 1.4), и полный баланс этих сил определяет изменение – нет, не скорости, а количества движения; именно поэтому столь важна взлетная масса («взлетный вес») самолета: одна и та же прибавка к количеству движения для самолета, в полтора раза более тяжелого, означает в полтора раза меньшее увеличение скорости. Сила, действующая здесь и сейчас, «не отвечает» за итог – за то, что получится, скажем, в конце взлетно-посадочной полосы. Она отвечает только за то, быстро или нет меняется количество движения здесь и сейчас.

---

[12] «Если я видел дальше других, то потому, что стоял на плечах гигантов». Ньютон родился в год смерти Галилея. Я бы оценил разницу между ними в три поколения.

[13] Конечно, если бы поле для воздушного хоккея имело размер хоккейного-с-шайбой, то по мере движения шайбы было бы заметно ее замедление из-за сопротивления воздуха, но в общепринятых вариантах воздушного хоккея это сопротивление никак не успевает себя проявить.

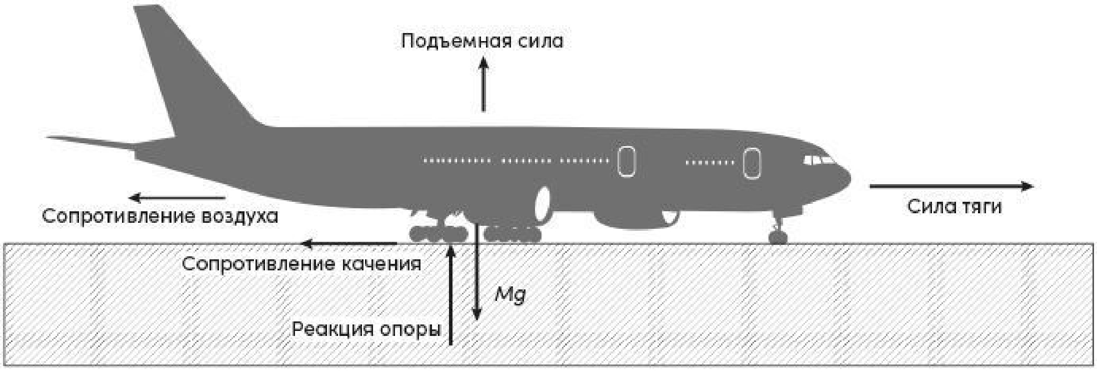


Рис. 1.4. Силы, действующие на самолет во время разгона

Сила говорит количеству движения, как ему изменяться

Ньютон не мог думать о решении задачи про взлетающий самолет, как не мог думать и о решении своих уравнений на компьютере. Я затрудняюсь даже сказать, о какой из этих двух тем он «не мог думать в большей степени». Но современные компьютеры определяют, как будут развиваться события при взлете самолета или ракеты, действуя в точности так, как это наверняка представлял себе Ньютон: если в первую миллисекунду после старта действует определенная сила, то приобретенное количество движения – это и есть та самая сила, умноженная на прошедший малый интервал времени (ту самую миллисекунду). В следующую миллисекунду сила тяги может измениться, а кроме того, появляется сила сопротивления со стороны воздуха. Две силы действуют в противоположных направлениях, одну надо вычесть из другой, а результат умножить снова на выбранный интервал времени длиной в миллисекунду, и так мы узнаем, сколько же количества движения *прибавилось* за вторую миллисекунду. Потом мы точно так же поступаем с третьей миллисекундой и не забываем суммировать все накопленные прибавки к количеству движения. Если нам нужна особая точность (и уж во всяком случае, если речь идет о взлете ракеты), то надо вспомнить, что по мере израсходования топлива уменьшается масса, поэтому пересчет количества движения в набранную скорость надо производить внимательно, помня, что и масса меняется от миллисекунды к миллисекунде. Например, ракета-носитель «Сатурн V» сжигала – и выбрасывала из себя – 15 кг смеси из горючего и окислителя в миллисекунду, т. е. 15 тонн в секунду.

Поведение – результат сложения причин

Стратегия, позволяющая узнать, что получится, т. е. делать предсказания о том, что будет, состоит в суммировании накопленных прибавок. Компьютер *буквально* суммирует накопленное по малым интервалам времени, а Ньютон (изобрел и) широко применял математический метод такого суммирования. Он называется интегрированием и не требует, чтобы разбиение на малые интервалы времени выполнялось буквально: такое разбиение встроено в сам метод, причем наилучшим возможным способом. Дело в том, что если для самолета миллисекунда – это малый интервал времени в том смысле, что действующие силы (да и масса) практически не успевают измениться, то для других процессов (например, горения или взрыва) расчет с шагом в миллисекунду даст неправильный результат, потому что за это время многое успевает измениться, и интервал времени надо выбирать еще короче. Вся идея интегрирования состоит в том, что интервал «уже взят» меньше любого, который вы в состоянии назвать. Поэтому интегрирование как математическая процедура точнее любого вычисления на компьютере. Другое дело, что результат интегрирования далеко, далеко не всегда удается *выразить* в обозримых терминах (т. е. используя привычные функции): хотя задача поставлена математически точно, записать точный ответ мы часто оказываемся не в силах. В таких случаях или изобретают приближенные способы осуществить математическую процедуру, или, конечно же, «сажают задачу на компьютер», т. е. применяют одну из многочисленных программ, которые, да, суммируют малые накопления.

Промежуточный итог: Ньютон не считал (и с тех пор никто, в общем, не считает), что законы природы могут описывать картину целиком. Кеплер со своими тремя абсолютно верными законами, в которых констатировалось поведение в целом, остался в прошлом. Законы Ньютона говорят, как причины (силы) определяют темп изменения количества движения. А дальше уж что получится путем «накопления», то получится – или на компьютере, или с помощью специальной математической процедуры. Если не удается ни то ни другое, то это наша проблема, а не проблема природы, в которой все «само себя суммирует» по мере того, как течет время: разнообразные причины постоянно действуют, накапливаемые изменения, в свою очередь, рождают новые причины, которые снова влияют, и так далее; время – это и есть способ упорядочения действующих причин и накапливающихся следствий.

*****

Всеобщее притяжение. Причины изменений количества движения планет в Солнечной системе (и подоплека законов Кеплера) – притяжение. Это ключевой дополнительный постулат, без которого у Ньютона ничего бы не получилось. Все тела притягивают друг друга. Одни делают это сильнее, другие слабее. Мерой («гравитационным зарядом») является масса каждого тела – то, что мы обычно измеряем в килограммах. Никакие подробности касательно состава и других свойств тел не имеют значения. Странно, нет? Из всего многообразия свойств материи в данном случае важно только одно число[14].

Масса – гравитационный заряд

Гравитационные заряды одного знака притягиваются, а масса любого тела может быть только положительной; никакие тела поэтому не отталкиваются. Это делает гравитацию всепобеждающей: нет возможности «закрыть» положительный гравитационный заряд отрицательным и тем самым спрятаться от действия гравитации (нельзя «заземлиться», давая зарядам стечь туда, где они скомпенсируются противоположными). Гравитация слаба (см. добавления к этой прогулке), но *неостановима*. Гравитация убывает с расстоянием, но делает это не слишком быстро – как обычно говорят, «по закону обратных квадратов». Я никогда не понимал, почему здесь появляется множественное число: в законе тяготения присутствует всего один квадрат всего одной величины – расстояния R между двумя маленькими кусками материи (*любой* материи, как уже было сказано) массами M_1 и M_2. Сила притяжения между ними равна

$$F = G\frac{M_1 M_2}{R^2}. \qquad (1.1)$$

Буква G здесь обозначает постоянную, которая, собственно, и выражает интенсивность гравитационного взаимодействия; это одна из Мировых постоянных – величин, встроенных куда-то глубоко в устройство нашей Вселенной. Численное значение этой постоянной – не

[14] Еще более странно, что одно и то же число – масса тела – измеряет *два* совершенно разных свойства: степень инертности и гравитационный заряд, но мы вынуждены отложить обсуждение этой загадки до одной из следующих прогулок.

предмет рассуждений, а экспериментальный факт. При всех «разумных» единицах измерения, выбранных для других входящих в формулу величин, постоянная G весьма мала, из-за этого гравитационное взаимодействие и оказывается таким слабым. Ньютон угадал формулу (1.1) (пришел к ней на основе ряда вспомогательных рассуждений), а многие тысячи раз ее использования с тех пор привели к впечатляющему прогрессу в познании мира[15]. Ньютонова теория тяготения позволяет делать отличные предсказания о движении притягивающих друг друга тел; она описывает и падение яблока, и движение Луны вокруг Земли. Лабораторией для систематических проверок ее предсказаний стала Солнечная система; мы увидим несколько ее триумфов на следующих прогулках.

Постепенно (сильно не сразу), впрочем, выяснилось, что приведенная формула хорошо работает, пока нет быстрых движений, а сама гравитация не адски сильная. В случае «быстрых» и «сильной» приходится довольно радикально менять взгляды на устройство тяготения (прогулка 6), но в Солнечной системе мы окружены «медленными» и «слабой», за одним-единственным астрономическим исключением: это движение планеты Меркурий вокруг Солнца, которое очень немного, но все же отличается от предсказанного по Ньютону (и которое у нас будет еще много поводов обсудить). Эти отличия свидетельствуют, что закон тяготения в форме (1.1) все же не является точным. Средства наблюдений, имевшиеся во времена Ньютона, не позволяли заметить отклонения в движении Меркурия, но у Ньютона были независимые основания для некоторого беспокойства за свой закон тяготения, исходя из того, что мы сейчас бы назвали проблемой передачи информации. *Предположим*, что Солнце по какой-либо причине внезапно начинает двигаться с ускорением в направлении какой-нибудь выбранной звезды. (Реализовать такое крайне непросто, но это не запрещено законами природы, а физические законы должны корректно описывать явления вне зависимости от того, в людских ли силах эти явления осуществить.) Спрашивается, как скоро Земля почувствует изменения в силе притяжения со стороны Солнца? Каким образом Земле *передастся* информация о том, где Солнце? Проблема с законом тяготения в виде формулы (1.1) в том, что если продолжить применять ее «как написано» (а что еще делать?!) и в этом гипотетическом случае, то мы вынуждены будем заключить, что изменения силы притяжения передаются к Земле (и вообще куда угодно) мгновенно. Это называется «действие на расстоянии»: эффект мгновенно передается через пустоту. Действие на расстоянии определенно не нравилось Ньютону:

> Тот факт, что гравитация должна быть внутренним, существенным образом присуща материи так, чтобы одно тело воздействовало на другое на расстоянии через пустоту без посредничества чего бы то ни было еще, способного передавать воздействие или силу от одного тела к другому, представляется мне таким колоссальным абсурдом, что, как я полагаю, никто со сколько-нибудь развитым пониманием философских вопросов в него не впадет. Гравитация должна вызываться каким-либо агентом, действующим постоянно и в соответствии с определенными законами; но вопрос о том, быть этому Агенту материальным или нематериальным, я оставил на Усмотрение моих читателей[16].
>
> Ньютон подозревал наличие Агента

[15] Привычная для нас формулировка «закон всемирного тяготения» содержит неидеальный, с моей точки зрения, перевод слова *universal* (*lex universalis*, если с латыни). Лучше было бы говорить «всеобщего», но калька в виде «универсальный закон тяготения» была бы еще лучше, подчеркивая ключевую идею универсальности: в гравитационном взаимодействии участвуют все тела, причем универсальным образом, а именно вне зависимости от того, из чего они сделаны, и любых других особенностей.

[16] Письмо Ньютона к Бентли, 1692 г.

Судя по этому фрагменту (который кажется мне гениальным из-за намека на совершенно неизвестную в то время форму материи – *поле*), Ньютон понимал, что отгаданный им закон не может быть последним словом в описании гравитации. Тем не менее ему пришлось постулировать закон природы, в котором говорится о силе гравитационного притяжения между двумя малыми кусками массы в зависимости от разделяющего их расстояния, но вообще ничего не сообщается о том, как гравитация распространяется через пространство – грубо говоря, *как «движется» сама гравитация* (в нашем изложении эта история тоже далеко впереди). Для всех тел Ньютон сформулировал закон движения, в котором ключевую роль играет изменение (количества движения) во времени, но в его законе гравитации не предусмотрена возможность какого-либо изменения гравитации во времени, потому что время вообще не участвует в формулировке этого закона (это *статический* закон). Ньютон не мог не видеть этого недостатка своей теории, но никаких данных, которые хотя бы отдаленно подсказывали, в каком направлении искать ответ, в то время не было. *Hypotheses non fingo*[17].

****

Уравнения движения. Закон природы «сила – это темп изменения количества движения» традиционно называется вторым законом Ньютона. Его еще часто называют *уравнением движения* или уравнениями движения. Вот как получается *уравнение*, например, для Марса. Солнце притягивает Марс с силой, которая зависит от расстояния между Марсом и Солнцем. Но оно-то и неизвестно, ведь задача как раз и состоит в том, чтобы *узнать*, как положение планеты зависит от времени. А как мы вообще применяем уравнения для решения задач? Мы делаем вид, что неизвестное нам известно, обозначаем его какой-нибудь буквой (например, но совершенно не обязательно, x) и стараемся переписать условие задачи, используя эту букву. В случае с Марсом мы поступаем точно так же, только буква кодирует не неизвестное нам число, а неизвестное нам поведение, т. е. функцию времени. (И таких букв/функций вообще-то три, когда движение происходит в трехмерном пространстве.) Условие задачи, которое надо использовать, чтобы составить уравнение, – это и есть второй закон Ньютона: мы совершаем с неизвестной функцией два разных действия, что дает две разные вещи, но их нужно приравнять. Во-первых, мы записываем выражение для силы; она зависит от расстояния, а потому и от искомого *положения* планеты по отношению к Солнцу. Во-вторых, мы берем темп изменения количества движения, в данном случае – темп изменения скорости планеты (умноженной на массу). Но сама скорость планеты – это темп изменения ее *положения*. Итак, мы выразили две разные величины через (пока неизвестное) положение планеты, изменяющееся со временем. Ньютон же говорит нам, что эти две разные величины *равны* друг другу. Все, что происходит в мире, происходит так, что они совпадают. Поэтому мы принимаемся за выяснение, как должно себя вести положение планеты в зависимости от времени, чтобы записанное равенство действительно было равенством. Это и выражают словами «решить уравнения движения».

Разумеется, не все стрелы летят по одной и той же параболе даже в отсутствие сопротивления воздуха, а планеты не сидят все на одной-единственной эллиптической орбите. Кроме собственно закона движения, важно и то, как я *запустил* стрелу (куда направил и с какой скоростью) и где именно находился и с какой скоростью двигался Марс, скажем, в 00:00:00 GMT 1 января 2000 г. Эти данные удачно называются начальными условиями. Они включают положения и скорости всего, что движется, в некоторый момент времени, который условно считается начальным. Решая уравнения движения для конкретных систем, мы каждый раз задаемся какими-то начальными условиями. Для разгоняющегося самолета это положение в начале

[17] «Гипотез же я не измышляю» (пер. А. Н. Крылова) – знаменитые слова из «Общего поучения» в финале «Математических начал натуральной философии». – *Прим. ред.*

полосы и нулевая скорость. Используя уравнения движения с учетом тяги, сопротивления воздуха в зависимости от скорости и подъемной силы в зависимости от скорости, мы можем определить, где и когда самолет оторвется от полосы.

Для сложных систем, как правило, ответ невозможно выразить в виде функции времени, записанной на бумаге обозримым образом. В таких случаях говорят, что «уравнения движения нельзя решить точно», но в этой фразе нет никакого глубокого философского смысла; это довольно технический момент, к тому же стимулирующий развитие как приближенных математических методов, так и компьютерных вычислений. Но для одинокой планеты, обращающейся вокруг звезды, по прекрасному математическому везению уравнения движения *можно* решить точно, и именно это Ньютон и проделал, с выдающимися последствиями.

Уравнения движения для одной планеты можно решить точно

****

Больше чем Кеплер. Ко временам Ньютона законы Кеплера можно было воспринимать как экспериментальный факт, т. е. результат наблюдений. Привнесенные в эту историю Ньютоном математика и дополнительная догадка о том, как действует гравитация, воспроизвели эллипсы для планет. Три закона Кеплера перестали быть разрозненными высказываниями и приобрели логическую связь между собой: все три оказались следствиями закона движения и закона тяготения. Слово «следствие» здесь означает математическую неизбежность: если верны второй закон Ньютона и закон тяготения Ньютона, то никак по-другому планеты двигаться не могут[18]. Точнее говоря, могут, но только не совсем планеты (которые одни только и входили в предмет вычислений Кеплера), а тела, прилетающие извне Солнечной системы и улетающие куда-то прочь из нее. Здесь произошло очередное маленькое чудо: с помощью логического анализа (математики) познание вышло за текущие пределы наблюдений. Математический вывод законов Кеплера в большой степени поддержал уверенность в том, что и догадки по поводу законов неплохи, и математика выбрана правильно. А затем та же математика стала для нас проводником, указывая на новые, ранее не наблюдавшиеся виды движения. Для тел вблизи Солнца их оказалось три (вместе с эллипсами), если не считать движения по прямой точно в направлении Солнца[19]. И буква, и дух метода исследования мира по схеме «причина – следствие» говорят, что нет никакой возможности принять одни выводы и отказаться от других – неважно, что другие виды движения не наблюдались. Вот все виды движения под действием притяжения к центральному телу (рис. 1.5).

---

[18] Речь идет о системе «Солнце плюс одна планета»; про остальные планеты мы временно забываем. Эта задача на профессиональном жаргоне, кстати, называется задачей Кеплера.

[19] Его редко упоминают, видимо, ввиду его тривиальности с теоретической точки зрения; с практической же точки зрения направить корабль с околоземной орбиты по прямой к Солнцу намного труднее, чем за пределы Солнечной системы.

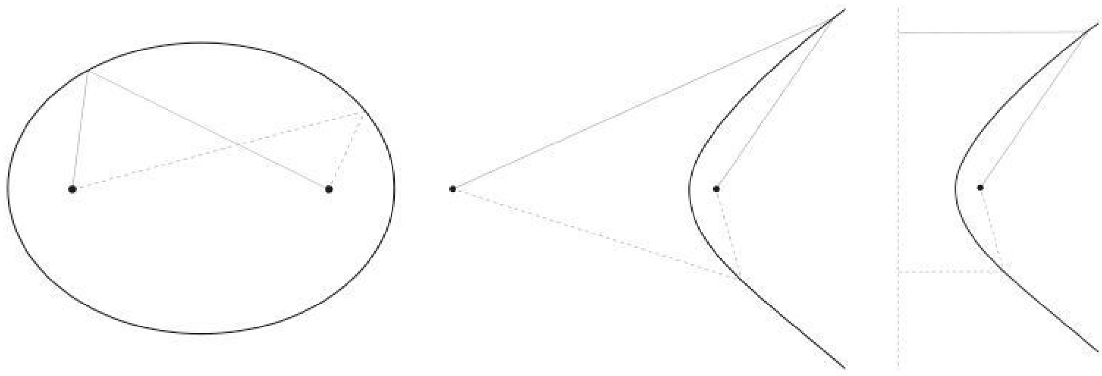


Рис. 1.5. Орбиты: эллипс, гипербола и парабола

Эллипсы. Во-первых (Кеплер был абсолютно прав!), эллипсы: математически точные эллипсы. Движение в разных частях эллипса происходит быстрее или медленнее точно так, как это утверждал Кеплер, вот только после Ньютона это утверждение перестало быть отдельным законом природы, а стало *следствием* закона движения и закона тяготения. Точно так же и третий закон Кеплера потерял самостоятельность.

Для Кеплера имеющиеся орбиты планет были уникальными. Для Ньютона, получившего контроль над тем, как эти эллипсы вырастают из законов и начальных условий, очевидно, что эллипсы могут быть очень разными: сильнее или слабее вытянутыми («совсем не вытянутый» эллипс – это попросту окружность). Математически тот или иной эллипс, по которому движется планета, определяется начальными условиями: тем, в каком направлении и с какой скоростью планета двигалась в выбранный «начальный» момент. Чтобы предсказать поведение реальных планет, надо взять эти начальные условия из наблюдений (определить скорость может оказаться сложнее, чем определить положение; но нужно и то и другое). Решение уравнений движения с такими начальными условиями дает в точности те траектории, которым реальные планеты и следуют, и мы уверенно предсказываем, что с ними будет в будущем[20]. Для *воображаемой* планеты начальные условия можно выбрать любыми, и эллипсы получатся самые разные: например, сильно вытянутые. Настоящие планеты в Солнечной системе таких вытянутых эллипсов не демонстрируют, но и здесь оказалось, что если математика показывает наличие решения определенного вида, то стоит поискать его в физическом мире. Кометы – это тела, которые движутся по сильно вытянутым орбитам (не каким-то, а именно эллипсам, пока они не портятся за счет прохождения вблизи массивных планет). При движении по вытянутому эллипсу тело проводит бóльшую часть времени далеко от Солнца, где его не разглядеть, и лишь за короткое время и с высокой скоростью пролетает вблизи Солнца. Именно тогда комета становится видна с Земли (которая, не будем забывать, и сама достаточно близка к Солнцу – примерно в 10 раз ближе, чем Сатурн, самая дальняя из известных во времена Ньютона планет, и в 30 раз ближе, чем Нептун)[21].

«Начала» Ньютона вышли в 1687 г., а в 1705-м его уравнения были использованы для предсказания, причем с размахом на полвека вперед: в 1758 г. будет наблюдаться комета. Эта комета сейчас называется 1P/Halley. В этом обозначении 1P указывает на ее порядковый номер (один!!) и ее «периодичность», а Halley – это в русской традиции Галлей, хотя точнее было бы Хэли или Холи. (Пример другой кометы: 67P/Churyumov – Gerasimenko; здесь пусть англого-

[20] А также и что было в прошлом: уравнения таковы, что их можно с равным успехом решать в обе стороны по времени, предсказывая будущее и описывая прошлое с одинаковой степенью надежности.

[21] Приближение к Солнцу делает комету заметной еще и потому – и даже в первую очередь потому, – что испаряемое с ее поверхности вещество образует *хвост*. При удалении от Солнца испарение прекращается и хвост исчезает, делая наблюдение кометы особенно трудной задачей.

ворящие мучаются с тем, как произнести.) Галлей – современник Ньютона, сыгравший немалую роль в том, чтобы «Начала» вообще увидели свет, – *не открыл* свою комету, он «всего лишь» заявил, что кометы, наблюдавшиеся ранее, в частности в 1531, 1607 (при Кеплере!) и 1682 гг., – это одна и та же комета. Заявление не было произвольной догадкой, но подтверждалось результатами вычислений того, как большие планеты влияют на орбиты комет (как именно они портят те самые вытянутые эллипсы). На основе вычислений, пользуясь законами Ньютона, Галлей и предсказал следующее появление кометы в 1758 г. Сбывшееся предсказание означало бы, что в Солнечной системе есть по крайней мере одно тело, не являющееся планетой, которое обращается вокруг Солнца.

Галлей скончался за 16 лет до установленного им срока возвращения кометы и был лишен возможности переживать «в реальном времени», сбудется или не сбудется его предсказание, – а переживать было от чего. Указанный им 1758 год прошел без кометы, точнее, почти прошел: комета объявилась практически в последний момент, 25 декабря. Увидел ее 35-летний саксонский фермер и астроном-любитель Палич. Его жизненная стезя определялась унаследованными им обязанностями по ведению фермерского хозяйства, и в юности ему приходилось скрывать свою любовь к астрономии[22]. Вообще-то я не думаю, что Галлей хоть сколько-нибудь сомневался, что его комета вернется и будет возвращаться. После трех полных оборотов вслед за своим появлением в 1758–1759 гг. комета вернулась в 1986-м, но я упустил свою возможность ее увидеть. Она приблизилась к Солнцу, но оказалась по другую сторону от него, чем Земля, что создало худшие условия для ее наблюдения с Земли за последние 2000 лет. Надеюсь, многие из моих читателей используют свой шанс в 2061-м. Целый класс комет – с периодом обращения от 20 до 200 лет – называют кометами галлеевского типа; типичная такая комета появляется во внутренней области Солнечной системы один-два раза за одну человеческую жизнь.

1 января 1801 г. на небе обнаружилось неизвестное до того тело. Автор открытия (астроном Пьяцци, католический священник из Палермо) продолжал наблюдения до начала февраля, когда ему пришлось прервать их из-за болезни. К сентябрю, когда он опубликовал результаты своих наблюдений, новое небесное тело заняло на небе положение, близкое к Солнцу, из-за чего наблюдать его стало невозможно. Возможность наблюдений должна была вернуться в конце года, но для их возобновления требовалось с достаточной точностью знать, где новое тело к тому времени окажется. В его розыске принял участие 24-летний Гаусс (по мнению многих – величайший математик из всех когда-либо живших). Он разработал «быстрый алгоритм» восстановления орбиты по трем наблюдениям и с его помощью определил эллипс, на котором это тело должно было находиться. На основе его предсказаний потерянная планетка, названная Церерой, была успешно «возвращена» 31 декабря 1801 г.; едва ли какая-нибудь другая подобная история наблюдений укладывается точно в календарный год[23]. Большая полуось эллипса, на котором пребывает Церера, – примерно 2,8 а.е. (астрономическая единица – среднее расстояние от Земли до Солнца, удобная мера длины в Солнечной системе); это между Марсом и Юпитером.

К решениям уравнений движения для планеты, притягиваемой Солнцем, следует относиться как к описанию *всех* возможных видов движения в такой системе. Несколько удивительно, что их так мало: кроме вышеупомянутых эллипсов, осталось только два.

---

[22] После себя Палич оставил три с половиной тысячи книг, часть из которых были переписанными от руки научными трудами, приобретение которых было ему не по карману.

[23] Пьяцци назвал открытое им тело Cerere Ferdinandea, почтив не только римскую богиню сицилийского происхождения, но и короля Неаполя Фердинанда IV, и короля Сицилии Фердинанда III (это одно и то же лицо). Королевская часть имени не прижилась (да и Фердинанд был в 1805 г. смещен Наполеоном и снова сделался королем, на этот раз Фердинандом I в Королевстве обеих Сицилий, лишь в 1816 г.). Сейчас мы относим Цереру – диаметр которой чуть меньше 1000 км – к классу карликовых планет. Они нам еще встретятся, но не на этой прогулке: все, кроме Цереры, пребывают намного дальше от Солнца – за орбитой Нептуна, так что до них еще надо добраться.

Гиперболы. Если запускать тела из какой-нибудь суперпушки, находящейся на некотором расстоянии от Солнца, то при достаточно большой начальной скорости тело не попадет на замкнутую орбиту, а, «завернув» вокруг Солнца, улетит прочь. Решение уравнений движения говорит, что такое движение непременно происходит по математически точным кривым, которые называются гиперболами. Они родственны эллипсам, но, в отличие от замкнутого эллипса, гиперболы разомкнуты. Два конца гиперболы по мере удаления от ее «середины» делаются все больше похожими на прямые (что неплохо согласуется с нашим представлением о том, что, когда тело находится очень далеко от Солнца, солнечное притяжение почти не ощущается и тело летит почти по прямой). У гиперболы тоже есть фокус (специальная точка вне самой гиперболы); гиперболические траектории небесных тел таковы, что (как и в случае эллипса) Солнце сидит точно в фокусе. Движение по гиперболе, как говорят, «не финитно»: тело приходит откуда-то издалека, отклоняется Солнцем и, изменив направление, уходит куда-то в неопределенное далеко, причем скорость его, хотя и уменьшается по мере удаления, приближается к некоторому фиксированному значению, не равному нулю.

Предсказание гиперболических орбит (возможность которых Кеплер, очевидно, не мог и подозревать) – это демонстрация силы математических методов и самого подхода к познанию, основанного на причинах явлений. В течение трех сотен лет можно было не наблюдать в Солнечной системе ни одного тела, летящего по гиперболе, и тем не менее ни у кого не было сомнений, что такое возможно – что в Солнечную систему может залететь гость извне, побыть здесь недолго и распрощаться навсегда, с необходимостью следуя по какой-то гиперболе. Такой гость издалека был замечен 19 октября 2017 г. и вскоре наречен Оумуамуа (рис. 1.6). Сейчас этот астероид, когда-то, видимо, выброшенный из какой-то иной планетной системы, уже вычерчивает «уходящую» от нас часть гиперболы. 30 августа 2019 г. была открыта и *межзвездная комета* 2I/Borisov. Кроме того, пять рукотворных объектов сейчас движутся «вокруг» Солнца по гиперболам, это значит, что они покидают Солнечную систему. Это «Пионер-10» (запущен в 1972-м), «Пионер-11» (1973), «Вояджер-1», «Вояджер-2» (1977) и «Новые горизонты» (2006).

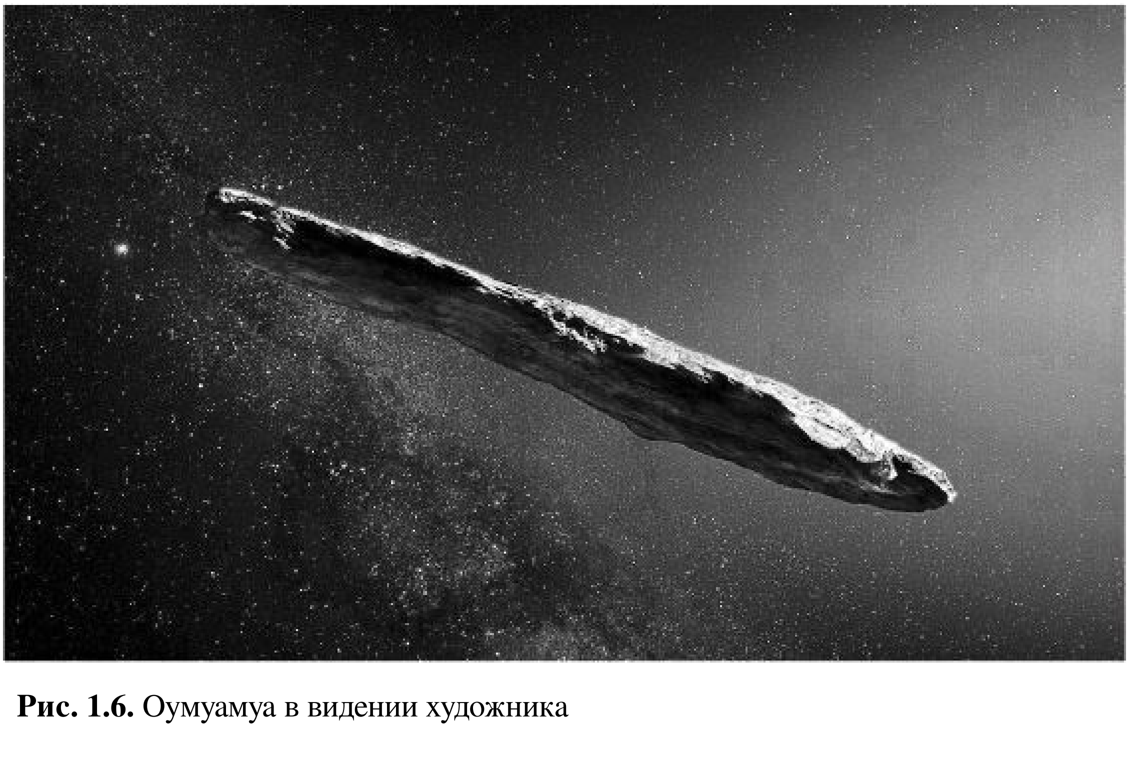


Рис. 1.6. Оумуамуа в видении художника

Параболы. Наконец, «между» эллипсом и гиперболой есть траектория еще одного типа. Она называется парабола. У нее тоже есть специальная точка, называемая фокусом, и несколько условно можно считать, что парабола – это «разомкнутый эллипс» (один из фокусов эллипса отодвинут неопределенно далеко, но по мере отодвигания эллипсу не давали стать слишком тонким). На первый же взгляд парабола больше похожа на гиперболу: у нее тоже уходят вдаль два конца, правда, «выпрямляются» они по мере удаления по другому закону, чем в случае гиперболы, да и улетающее тело движется по ним иначе: скорость движения делается все меньше и меньше, постепенно приближаясь к нулю.

Едва ли хоть одно тело вблизи какой-нибудь звезды летит по параболе, но причина не в нарушении соответствия между тем, что предсказывает математика, и тем, что может иметь место в реальности. Причина в сложности «тонких настроек». Если вы имеете в своем распоряжении космическую пушку, чтобы запускать тела в сторону Солнца, то, пока вы будете выстреливать тела с большой скоростью, Солнце не сможет оставить их в своей сфере влияния и траектории этих тел станут гиперболами. Если же вы понизите скорость выстреливания, то притяжения Солнца хватит на то, чтобы удержать тело при себе, а это значит, что траектория окажется эллипсом. При заданном расстоянии от Солнца лишь единственное значение скорости приведет к тому, что тело полетит по параболе. Стоит выстрелить чуть или сколь угодно быстрее – получатся гиперболы, а чуть или сильно медленнее – эллипсы. В этом смысле гипербол и эллипсов «много», а парабол «мало». В реальности параболы в качестве орбит не запрещены, а просто не случаются.

Вот, собственно, и все, что может произойти: эллипсы, гиперболы или в крайнем случае параболы. Никаких более замысловатых траекторий, если речь идет о движении под действием притяжения к одному центру. Никаких, например, вариантов «по спирали падает на Солнце» – что не может не радовать обитателей одной из планет, обращающихся вокруг Солнца.

Кеплер абсолютно правильно прочитал многостраничные таблицы с числами, но нечеловеческие усилия и озарение, необходимые для такого прочтения, оказались больше никому не нужны: знание о том, какими могут быть орбиты, стало доступным и первокурснику. «Особенно замечательным, – писал Эйнштейн в статье, посвященной 200-летию кончины Ньютона, – должно было казаться выяснение того факта, что причина движения небесных тел тождественна столь привычной нам из повседневной жизни силе тяжести»[24]. И это не все. Принципы, один раз успешно выведенные из наблюдений (исторически – в ограниченной части Солнечной системы), наделили нас способностью делать выводы об устройстве мира и предсказывать поведение его частей *далеко* за пределами Солнечной системы. Мир Ньютона, полностью поглотивший мир Кеплера (и впитавший в себя относительность Галилея), постепенно распространялся на все шире приоткрывавшуюся Вселенную, не требуя для этого никаких изменений в своих фундаментальных положениях. Солнечная система отлично поддерживала единство теории и наблюдений: например, солнечные и лунные затмения известны на любой «мыслимый» момент времени в будущем или прошлом, и эти предсказания выполняются много точнее, чем расписание пригородных поездов. Простые принципы, заложенные в описание мира, работали, работали и работали; новые принципы не требовались. А если все, что происходит, случается в соответствии с законами движения, то все ли предсказуемо? Если знать положения и скорости всех тел в некоторый момент времени (упоминавшиеся уже начальные условия), то можно ли узнать будущее, просто решая уравнения движения? И вообще, в космосе все правда так просто? И есть ли границы, за которыми сформулированные законы теряют применимость?

Источник развития знания – несоответствия в имеющемся знании. Мощь ньютоновской картины мира, основанной на законах движения, определялась в том числе тем, что границы

[24] Пер. А. М. Френка.

ее стали появляться в поле зрения не раньше чем через полтора столетия чрезвычайно плодотворного ее развития. Мы доберемся до этих границ гораздо быстрее, но еще до того нас ждут несколько шедевров ее использования, как в рукотворных ситуациях, когда требуется управлять движением ради достижения практических целей, так и для понимания устройства мира самого по себе.

*****

Движение как организация. Планеты, которые «бродят» по небу, а в действительности движутся по эллипсам, *остаются* в Солнечной системе, а не улетают прочь. Слово «система» подчеркивает привычку мыслить о нашем космическом окружении как о чем-то едином и заодно достаточно устойчивом. Причина такого положения дел в том, что существует вид движения под действием притяжения (да, эллипсы), участники которого не разбегаются в разные стороны. Открывая планеты у других звезд, мы тоже говорим о планетных системах и тоже, разумеется, рассуждаем в терминах эллипсов, по которым там летают планеты. На тех расстояниях, с которых мы их наблюдаем, ничего, кроме планет (и иногда значительных скоплений пыли), обнаружить не удается, но про свою Солнечную систему мы хорошо знаем, что в ней содержится *множество* разного, кроме планет; и все разнообразные ее обитатели летают вокруг Солнца тоже по эллипсам – в большей или меньшей мере искажаемым влиянием других обитателей. Я легко соглашусь с тем, что самое интересное из происходящего состоит как раз в этих взаимных влияниях, вызванных ими изменениях орбит и прочих драматических событиях, но тем не менее буду настаивать на том, что Солнечная система организована в нечто единое благодаря замкнутым траекториям. Ту же идею организации движущихся частей в нечто единое мы усматриваем в структурах большего масштаба: Солнечная система вместе с другими звездами, а также газом и пылью обращается вокруг центра галактики Млечный Путь, и все вместе они тоже составляют «систему»; другие галактики в дальнем космосе – основные структурные элементы, в терминах которых мы говорим об этом космосе. Движение в сочетании с законом притяжения – элемент организации и одновременно инструмент для проверки нашего понимания происходящего во Вселенной; ближе к дому это еще и возможность применить достигнутое понимание на практике. Движение как предмет для применения имеющихся знаний и способ получения новых – объект нашего внимания на следующих прогулках.

Добавления к прогулке 1

Об уравнениях. Волей-неволей нам предстоят прогулки в компании уравнений: их приходится упоминать и о них рассуждать, даже если сами они не присутствуют здесь во всей своей математической полноте. Нелишне сказать несколько слов об уравнениях вообще.

Если говорить одним словом, то уравнение – это *задача*. Сформулирована эта задача в виде двух различных математических выражений, соединенных знаком равенства. Как правило, требуется определить, каким должно быть неизвестное, чтобы это равенство *действительно выполнялось* (например, каким должно быть x, чтобы выполнялось равенство $x^2 = 1$). До конца этого абзаца будем считать, что неизвестное – это число или числа, «любые» или из какого-то класса (например, иногда бывают интересны целые числа или, скажем, положительные; к уравнению всегда прилагается или подразумевается информация о том, в каком классе следует искать неизвестное). Кроме неизвестного или неизвестных, уравнения содержат нечто известное или считающееся известным. В буквальном смысле известными (известнее не бывает) являются конкретные числа, но очень часто в качестве известных фигурируют и буквы. Смысл букв в том, что их *можно* заменять числами по нашему выбору, но желательно делать это, когда уравнение уже решено. Получить решение «в буквах» всегда здорово, потому что решение относится тогда не к одному-единственному уравнению с конкретными числами, а к семейству уравнений. Хрестоматийный пример – квадратное уравнение, в котором одна буква *x* обозначает неизвестное, а две или три другие буквы считаются известными. Такое уравнение можно действительно решить «в буквах», т. е. в общем виде, но это редкая ситуация – например, с уравнением пятой степени (содержащим x^5 и более низкие степени) этого сделать нельзя, за исключением особых случаев, и приходится решать уравнение каждый раз заново с конкретными числами. Компьютер, как правило, неплохо справляется с уравнениями, в которых, кроме неизвестного, присутствуют только числа.

Но неизвестными могут быть не только числа, но и более сложные объекты – функции. Пример функции – *поведение* (зависимость от времени) какой-либо величины, скажем объема вашего вклада в банке. Данные о том, что каждый день вклад увеличивается на 0,001 своей величины, являются, по существу, уравнением, из которого можно найти это поведение – *функцию времени* – и, например, узнать размер вклада через 1000 дней. Часто (хотя и не всегда) в задачах про такое поведение нет «зернистости» в виде фиксированного отрезка времени («дня»): считается, что функция изменяется непрерывно, и формулировка уравнений к этому приспособлена (такие уравнения называются дифференциальными, что примерно означает «имеют дело с *очень* малыми изменениями»). Пример поведения – координаты тела, движущегося в пространстве; чтобы задать его траекторию, требуются три функции времени – по одной для каждой из координат. Когда тела движутся под действием каких-либо сил, эти функции не произвольны, а определяются уравнениями движения.

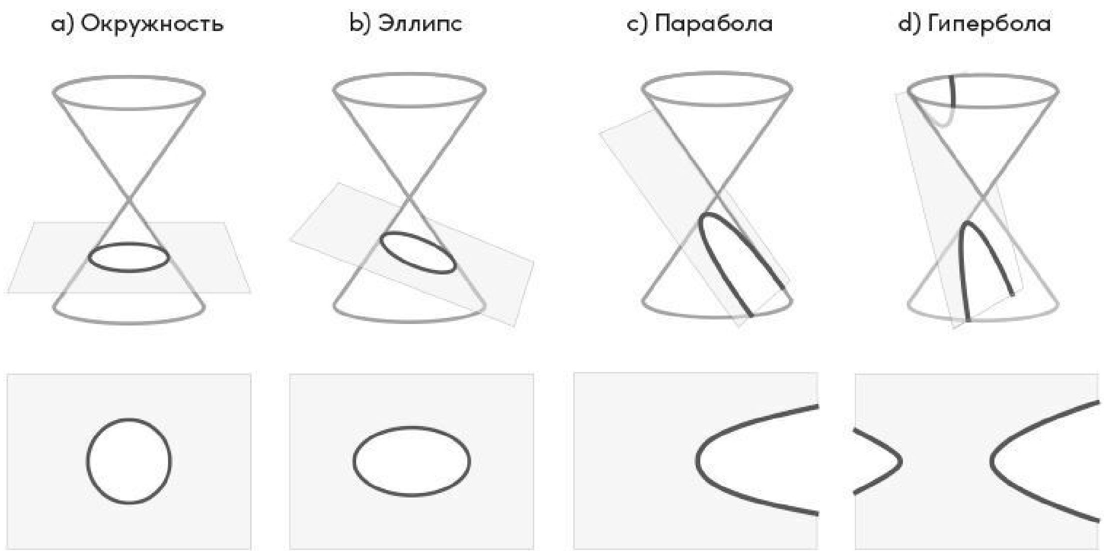


Рис. 1.7. Конические сечения

Уравнения, которые выражают законы природы, описывают точную (количественную) связь между какими-то величинами. Такие уравнения позволяют делать предсказания о поведении и свойствах изучаемых систем. Когда предполагается наличие в природе какой-либо связи, сопоставление предсказаний с наблюдениями служит для отбора тех уравнений, которые приводят к более точным предсказаниям. Несколько упрощая, можно сказать, что таким образом и формулируются работающие законы природы.

Конические сечения. Орбиты трех типов – эллипс (становящийся окружностью в частном случае), парабола и гипербола – объединены самим фактом того, что они и только они (кроме еще тривиального случая прямой линии) являются траекториями движения тел под действием притяжения одного центра. Они же объединены свойством совершенно иного типа:

они и только они (и в специальном случае – прямая) возникают как пересечение плоскости и конуса. Конус – это поверхность, которая образуется, если свернуть в воронку лист бумаги, но с одним уточнением: математический конус продолжается по обе стороны от вершины, как видно уже на рис. 1.7*a*. Если теперь пересечь конус плоскостью, которая перпендикулярна оси симметрии, то в сечении получится окружность. Наклоняя плоскость, мы получаем в сечении разнообразные эллипсы – всё более вытянутые по мере того, как наклон плоскости увеличивается (рис. 1.7*b*), – до тех пор, пока наклон не станет таким же, как наклон образующей конуса. В этом случае (рис. 1.7*c*) в сечении получается парабола (в некотором роде, как мы говорили, эллипсов много, а парабола одна; здесь эта идея выражается в том, что парабола возникает при точно обозначенном угле). Наклоняя плоскость еще сильнее, получаем в сечении гиперболы – разные в зависимости от угла наклона (рис. 1.7*d*). Здесь требуется небольшое пояснение: каждая гипербола имеет две части, потому что плоскость задевает и верхнюю, и нижнюю половины конуса. Говоря о гиперболе как о траектории движения, имеют в виду *одну* ее половину (которую тогда тоже называют гиперболой).

Почему три вида кривых, и только они, оказались решением двух столь различных задач (задача Кеплера и конические сечения) – вопрос, который нельзя было не задать некоторое число раз за те триста с лишним лет, как этот факт выяснился (конические сечения как таковые были известны в Древней Греции). Эллипс, кроме того, геометрически полностью симметричен относительно двух фокусов, что видно уже из построения с ниткой, показанного на рис. 1.1; но в Солнечной системе нет никакой «нитки», которая указывала бы планете, как двигаться, а сила действует на планету всегда и только в сторону одного из фокусов. Как же геометрия возникает из закона тяготения? Самый простой ответ: она *получается* как решение уравнений. Этот ответ, однако, никак не проясняет механизм, а из-за того, что уравнения здесь дифференциальные, он не относится к числу «элементарных». Есть ли *элементарное* решение, т. е. такое, которое позволяет перевести одну задачу (нахождение орбиты) в другую (построение конического сечения), причем делает это «непосредственно» и без использования математических средств типа дифференциального исчисления? Такое элементарное решение известно; в частности, ему посвящена «забытая» лекция Фейнмана – забытая на фоне других, прочитанных им в Калтехе и вошедших в «Фейнмановские лекции по физике». Однако Фейнман предваряет рассуждения таким предупреждением:

> Элементарное вовсе не означает легкое для понимания. Элементарное означает, что для понимания не требуется почти никаких предварительных знаний, кроме бесконечно развитых умственных способностей.

Две «разные» параболы. Параболы оказались ответами в двух задачах: «планета» (частный случай движения вокруг центра притяжения, скажем Солнца) и «стрела», или, выразительнее, «камень» (движение, начинающееся под углом к горизонту вблизи земной поверхности). Одна и та же математическая кривая вполне может оказаться решением уравнений, записанных для различных систем, при разных предположениях. В задаче «планета» предполагается, что сила притяжения убывает при увеличении расстояния – «обратные квадраты», как это записано в (1.1). Парабола может тогда получиться в качестве решения при тщательно подобранных начальных условиях. В задаче «камень» предполагается другое: *вблизи* земной поверхности сила притяжения практически постоянна; поэтому можно спокойно пренебречь тем, как она убывает по мере подъема над поверхностью. В *такой* постановке задачи траектория брошенного тела – всегда парабола (разумеется, если убрать весь воздух – например, перенести эксперимент на Луну и там от души пострелять из рогатки), за очевидным исключением случаев бросания строго вверх и строго вниз. Если все же проявить дотошность и решить задачу про камень, не забывая, что притяжение ослабевает с высотой (и меняет направление по мере смещения вдоль земной поверхности!), то траектория от старта до падения окажется частью *очень* вытянутого эллипса – очень коротким отрезком его дуги вблизи его верхней части. На рис. 1.8 изображена часть эллипса, вытянутого несравненно слабее, чем тот, на который можно запустить камень любыми подручными средствами, но рисунок передает идею: небольшая дуга эллипса практически совпадает с параболой. Траекторией является только та часть каждой кривой, которая находится над поверхностью Земли, и, пока максимальная высота подъема мала по сравнению с радиусом планеты, участок эллипса неотличим от параболы. Поэтому вблизи поверхности Земли можно считать, что брошенные под углом к горизонту тела летят по параболе. Это Галилей и установил.

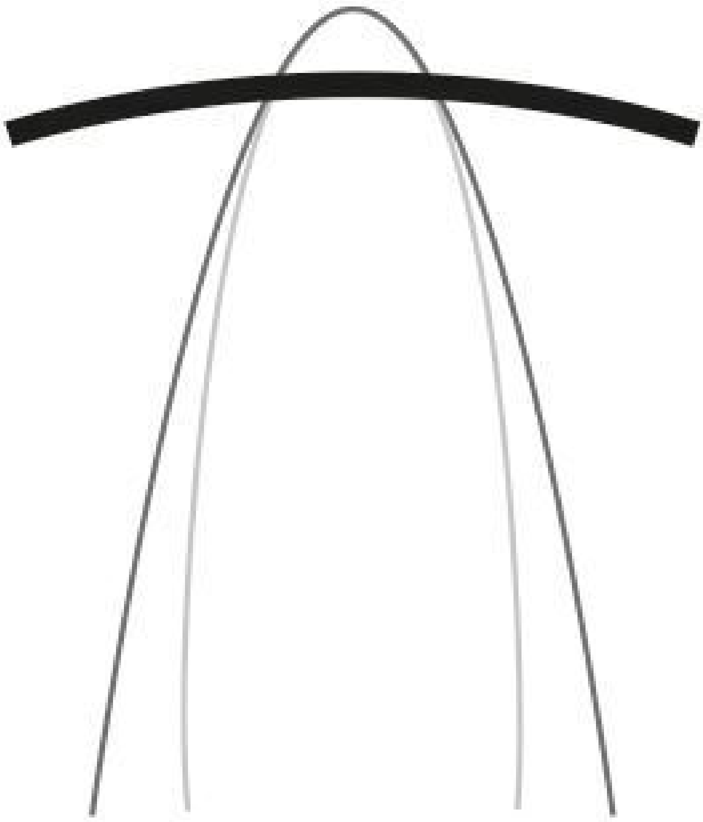


Рис. 1.8. Часть эллипса (светло-серая линия) и часть параболы (темно-серая линия), которые неразличимо близки около вершины. Широкой линией показана поверхность Земли. Только участки кривых, которые лежат выше нее, могут быть траекториями брошенных тел, а в этой части эллипсы очень похожи на параболы, пока они достаточно близки к поверхности

Точная парабола возникает в задаче о стрельбе с поверхности Земли, когда притяжение Земли учитывается «по-настоящему», в соответствии с законом тяготения Ньютона, а скорость имеет строго определенное значение. Если вы стреляете из суперпушки, расположенной на поверхности, то при достаточной скорости снаряда, посланного под углом к горизонту, он отправится путешествовать вокруг Земли, описывая эллипс. Если скорость выстрела еще увеличить, то наступит момент, когда снаряд уйдет от Земли неопределенно далеко. Минимальную скорость, при которой это происходит, называют второй космической скоростью или параболической скоростью. Это минимальная скорость освобождения: та скорость, которую необходимо придать телу, чтобы оно преодолело гравитацию, например, Земли и улетело «совсем». Движение тогда происходит по параболе! (Разумеется, если запустить снаряд быстрее, то он тем более улетит от Земли – но уже не по параболе, а по гиперболе.)

Парабола – траектория самого неторопливого расставания

Гравитация и заряды. Царица Вселенной – гравитация – это самая слабая из четырех фундаментальных сил. И одна из двух дальнодействующих. Вторая дальнодействующая – электромагнетизм, и, чтобы оценить, во сколько раз одна сильнее или слабее другой, можно сравнить силу, с которой два расположенных на определенном расстоянии электрона отталкивают друг друга электрически, и силу, с которой они притягиваются гравитационно. Гравитационное притяжение слабее электрического отталкивания примерно в 4 100 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 раз. Это *большое* число раз, независимо от вашего определения слова «много». Намеки на эту огромную разницу повсюду вокруг нас: когда я держу в руках груз весом 10 кг, сила химических связей между молекулами в моем теле (которые в основе своей электромагнитные, но в заметно «ослабленном» варианте по сравнению с взаимодействием одиночных электрических зарядов) позволяет мне с успехом противодействовать притяжению *целой планеты*. И тем не менее на больших масштабах Вселенную структурирует гравитация, а вовсе не электромагнетизм, за которым остался весь мир сред, материалов и вещей вокруг нас. Причина в том, что электрические заряды встречаются в двух разных видах: положительные и отрицательные, и в зависимости от этого они могут и притягиваться, и отталкиваться. Положительные и отрицательные заряды распределены вокруг нас поровну, так что окружающие тела в целом электрически нейтральны, т. е. не имеют электрического заряда (хотя глубоко внутри с зарядами происходит много интересного). Ничего похожего не происходит с гравитационными зарядами – т. е. массами – окружающих тел: при всей слабости гравитации тела заведомо не являются гравитационно нейтральными.

Телескоп «Кеплер». «Кеплер» занимался поиском случаев периодического ослабления света от звезды из-за прохождения планеты по ее диску, наблюдаемому с Земли, – что-то вроде крошечной, микроскопической пылинки на фоне прожектора. Это наш основной источник знаний об экзопланетах на данный момент, хотя такой метод их поиска и имеет некоторый перекос: чаще открываются более близкие к своей звезде планеты, чем далекие, потому что при небольшом наклоне плоскости орбиты планеты к лучу зрения близкая к своей звезде планета скорее окажется на фоне диска этой звезды, чем далекая (а перекос хорошо осознается, и разрабатываются меры по его преодолению для оценки планетного «населения» в галактике Млечный Путь).

Телескоп «Кеплер» работал не на околоземной орбите, а летал (и сейчас летает, только срок службы уже закончился) вокруг Солнца, близко к земной орбите и собственно к Земле, но несколько отставая от нее. Его пришлось убрать подальше, чтобы избежать ненужных затмений части неба близкой Землей, влияния света, отражаемого от Земли, а также влияния лунной гравитации на его орбиту (из-за обращения Луны вокруг Земли – влияния переменного, что и составляет проблему). Оборот вокруг Солнца «Кеплер» совершает за 372,5 суток, что означает отставание от Земли на 26 млн километров за год. Через примерно 25 лет «Кеплер» окажется с противоположной стороны от Солнца по отношению к Земле, а лет через 50 снова приблизится к нам. Быть может, тогда будет не очень дорого снять его с орбиты и поставить в музей.

Признания и литературные комментарии

Количество движения (в простейшем случае – произведение массы на скорость) имеет и более короткое название – «импульс», и этот термин можно было бы выучить и использовать, но я предпочел вариант, звучащий несколько более значаще. Для системы, на которую ничто не действует извне, суммарное количество движения всех ее частей – сохраняющаяся (не меняющаяся с течением времени) величина. В эквивалентной форме этот факт известен как самый, наверное, популярный – третий – закон Ньютона, на котором я не стал специально останавливаться (но о законах сохранения сказано еще немного в приложении Б).

Высказывание Эйнштейна о Кеплере взято из статьи "Albert Einstein über Kepler", впервые напечатанной в газете *Frankfurter Zeitung* в ноябре 1930 г.; русский перевод под названием «Иоганн Кеплер» включен в сборник статей Эйнштейна [42]. Там же – его статья «Механика Ньютона и ее влияние на формирование теоретической физики», написанная к 200-летию кончины Ньютона, из которой я также привожу цитату. Разнообразные подробности о жизни и трудах Тихо Браге, Кеплера, Галилея и Ньютона (и не только их) можно найти в энциклопедической книге [19]. Труды и жизнь Галилея в период его противостояния с инквизицией, представленные на фоне эпохи, интриг и растущего научного знания, – предмет захватывающего чтения в [13]. На Дейва Скотта, бросающего предметы на Луне, можно посмотреть по ссылке https://youtu.be/Oo8TaPVsn9Y. Цитата из самого Галилея взята из издания [8].

В связи с появлением у Кеплера некруговых орбит Владимир Сурдин отмечает определенный элемент «психологической подготовки»: уже в Птолемеевой *геоцентрической* системе мира Земля располагалась не в центре главной окружности (деферента), а была смещена от центра; в противоположную сторону от центра был смещен эквант – точка, при наблюдении из которой движение планеты выглядит равномерным. По поводу того, что «Ньютон угадал закон тяготения», стоит отметить, что Ньютон не действовал в вакууме, а был участником обмена идеями; развитие событий от переписки Ньютона с Гуком до появления «Начал» ясно и выразительно описано в книге [14] (чем ее содержание далеко не исчерпывается); я благодарен Дмитрию Баюку за обсуждение этих вопросов. Несколько упрощенное, но тоже интересное изложение истории, приведшей к появлению «Начал», имеется в книге [3]. Там же (помимо всего другого) рассказано и о Галлее. Научная и общественная биография Ньютона систематически исследуется в книге [106]. Интересно, насколько задержалось бы развитие науки в Новом времени, если бы (в гипотетической параллельной Вселенной) уравнения движения для планет не позволяли обозримым образом выразить точное решение и на основе постулатов Ньютона не удалось бы продемонстрировать явного быстрого успеха?

«Забытой» лекции Фейнмана посвящено блестящее изложение каналов minutephysics и 3Blue1Brown: https://youtu.be/xdIjYBtnvZU. Заодно стоит посмотреть рассказ в том же стиле от 3Blue1Brown, почему из конических сечений возникают именно эллипсы: https://youtu.be/pQa_tWZmlGs. «Незабытые» «Фейнмановские лекции по физике» [35] много раз переиздавались на русском, но я продолжаю пользоваться своими томиками, вышедшими в 1976 г. (это было уже третье русское издание). Как мне кажется, не потерял своей актуальности рецепт по-настоящему заинтересованного знакомства с физикой: читать первый том «Фейнмановских лекций…» до состояния потери понимания, и к тому моменту как раз станет понятно, выстраиваются ли ваши отношения с этой формой знания. Воспользуюсь случаем и порекомендую еще одну (тоже несчетное число раз переиздававшуюся) книгу Фейнмана [34], которая остается универсально актуальной – в частности, актуальной для большинства этих прогулок.

По поводу «зоны обитаемости», о которой говорят в связи с экзопланетами. Владимир Сурдин считает важным напоминание, что так называется диапазон расстояний от звезды, в пределах которого температура на поверхности планеты позволяет существовать там жидкой воде, и *ничего* сверх того не предполагается; сам Сурдин, однако, предпочитает название «зона жизни». Рисунок 1.3 взят с сайта NASA https://exoplanets.nasa.gov/resources/131/lining-kepler-habitable-zone-planets-up, где приведен с целью проиллюстрировать сравнительные размеры потенциально обитаемых планет, открытых с помощью телескопа «Кеплер». Никакие подробности о том, как они на самом деле *выглядят*, нам, конечно, неизвестны. Достаточно условно и изображение Оумуамуа на рис. 1.6, взятое с сайта https://solarsystem.nasa.gov/asteroids-comets-and-meteors/comets/oumuamua/in-depth/, где оно приведено со ссылкой на Европейскую южную обсерваторию (European Southern Observatory, ESO) и дизайнера Мартина Корнмессера. Главное в нем – крайне необычное для астероида соотношение (около 10: 1) его большого и малых размеров.

На восходящий к Галилею вопрос о причинах, определяющих эффективность математики в науках, Тегмарк [31] отвечает максимально последовательно с минимальным, как мне кажется, числом дополнительных гипотез и построений: потому что Вселенная *и есть математика*. Я бы, несомненно, согласился с этим заявлением в еще большей степени, чем согласен сейчас, если бы лучше понимал, что в точности оно значит. Среди немалого числа высказываний о роли математики в науках название статьи [5] стало мемом, она вошла и в сборник [6]; в этих изданиях переводчики почему-то сократили имя автора, Юджин, до буквы Е.

Прогулка 2
Танец с небесами

Маршрут: *От Земли к Луне и обратно. – Центр масс. – Кто за рулем. – Космические парковки XVIII века. – Гало-орбиты. – Греки и троянцы. – Полет из пращи. – Где прибавить ходу. – Рандеву. – Танец с небесами.*
Главный герой: *Майкл Коллинз*

От Земли к Луне и обратно. Прекрасные в своем совершенстве кеплерово-ньютоновы эллипсы могут навевать скуку – ведь это всего лишь эллипсы. В действительности же движение в космосе в бесконечное число раз разнообразнее. Дело просто в том, что математическая задача, которую решил Ньютон, была задачей про *одну* планету, притягиваемую Солнцем; в качестве траекторий действительно получились только эллипсы[25]. Однако планет у Солнца в действительности несколько, еще больше – их лун (спутников), а закон гравитации, как Ньютон же его и придумал, универсальный: все притягивается ко всему. При наличии многих тел задача сразу меняется, а движение оказывается практически бесконечно разнообразным. Правда, математические трудности на пути точного решения задачи многих тел, притягивающих друг друга, непреодолимы – во времена Ньютона, в общем, в той же мере, что и сейчас. Проблема, конечно, в том, что каждое тело движется в зависимости от того, как оно притягивается к другим, а это притяжение зависит от того, какое тело где находится. Записать уравнения движения – легче легкого, а вот решить их в обозримом виде (т. е. в виде небольшого числа формул, из которых «виден ответ») невозможно. Оказываемся ли мы снова беспомощными перед лицом Вселенной, желая на основе законов движения предсказать, куда и с какой скоростью что-то полетит? И да и нет.

Движение под действием двух центров притяжения – предмет существенного интереса с точки зрения путешествия с Земли на Луну. Масса космического корабля настолько незначительна по сравнению с массой обоих тел, что не оказывает влияния на их орбиты; зато движущиеся друг относительно друга Земля и Луна влияют на космический корабль так, что его реальная орбита может оказаться где-то в интервале от «слегка некеплеровой» до «совершенно некеплеровой». И в этой задаче нельзя действовать так, как действовал Кеплер: попытаться сразу сказать, какой же траектории будет следовать корабль. Да и Ньютону было бы не под силу коротко определить эту траекторию: для нее нет не только понятного названия типа «эллипс», но и единой формулы, которая полностью и точно описывала бы ее в одну или хотя бы в несколько строк. Ньютон, правда, *вовсе* не занимался расчетами полетов космических кораблей к Луне – хотя, кто знает, если бы эта задача была поставлена перед ним королем (как она была поставлена советским руководством перед М. В. Келдышем в конце 1950-х), он мог бы этим загореться и посвящать меньше времени другим своим увлечениям и административным обязанностям (Келдыш между тем был президентом Академии наук СССР).

Точно учесть совместное влияние Земли и Луны непросто

Первой земной вещью, которую удалось отправить на Луну, предварительно проделав все необходимые вычисления (и, само собой, преодолев многие технологические сложности), была «Вторая космическая ракета», как она тогда называлась, – аппарат, задним числом переименованный в «Луну-2». «*Первая* космическая ракета» (в установившейся позднее терминологии – «Луна-1»), стартовавшая с территории СССР в самом начале 1959 г., промахнулась

[25] Мы помним и о гиперболах, но не будем упоминать их каждый раз; в конце концов, что прилетело по гиперболе, то и улетело.

мимо Луны больше чем на три лунных радиуса из-за слишком поздней команды на выключение разгонного двигателя. Ошибки были учтены, и уже в сентябре «Луна-2» попала в цель. Расстояние от центра Земли до центра Луны – 110 с небольшим лунных диаметров; при этом Луна не стоит на месте, а движется относительно Земли со средней скоростью около 3680 км/ч. И да, притягивает космический аппарат с силой, мало существенной на большей части пути, но все возрастающей по мере приближения к Луне, – тогда как притяжение Земли ослабевает по мере удаления. Корабль/ракету при этом именно *запускают*, почти как шар в боулинге: траектория в основном задается тем, как сработал двигатель при старте с околоземной орбиты, а далее движение происходит под действием одного только тяготения; хорошо, когда по дороге есть возможность небольшой коррекции. Отправить людей к Луне и благополучно вернуть их обратно удалось ценой напряженных целенаправленных усилий только через девять с лишним лет после полета «Луны-2».

Первые предметы доставлены на Луну в 1959 г.

Первым (после, конечно, «Из пушки на Луну») транспортным средством, на котором люди отправились к Луне, был «Аполлон-8» в конце декабря 1968 г. Задача состояла в том, чтобы туда добраться (преодолев примерно 384 000 км), выйти на орбиту вокруг Луны, а затем, наоборот, уйти с нее и вернуться домой. За словами «выйти» и «уйти», как и «добраться» и «вернуться», стоят концентрированные смыслы и сложные технологические решения. Когда три ступени ракеты «Сатурн V» вывели «Аполлон-8» (вместе с третьей ступенью, которой предстояло еще поработать) на низкую околоземную, почти круговую орбиту, все системы корабля были проверены на предмет дальнейшего путешествия к Луне. Действия, необходимые для перехода на курс к Луне, надлежало выполнить в строго определенном месте траектории, которое на рис. 2.1 обозначено буквами TLI, что означает Trans Lunar Injection («переход на траекторию полета к Луне»). Сама «инъекция» состояла в точно дозированном включении двигателя третьей ступени при строго определенной ориентации корабля.

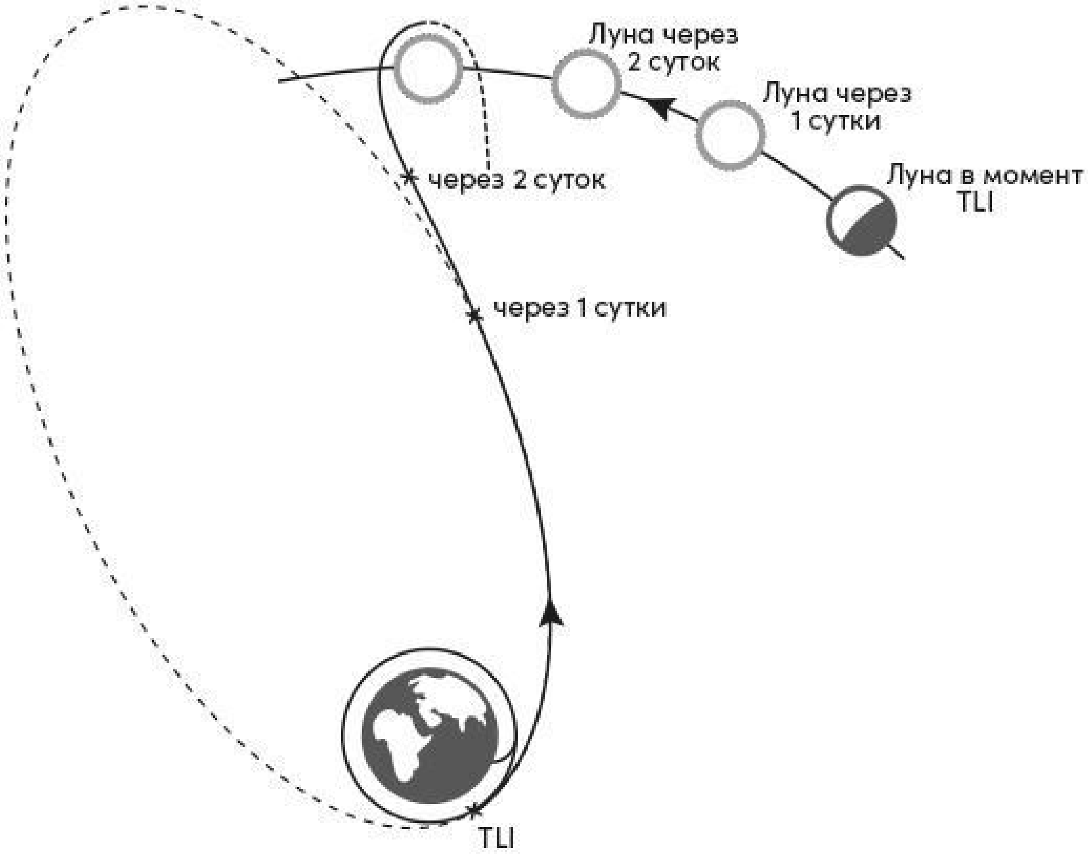


Рис. 2.1. Схема полета «Аполлона-8» к Луне. Размеры Земли и Луны указаны не в масштабе, соответствующем расстоянию между ними. Расстояние от центра Земли до центра Луны примерно в 30 раз превышает диаметр Земли и в 110 раз – диаметр Луны (а Земля «шире» Луны в 3,7 раза). Большой эллипс в действительности вытянут гораздо сильнее

За некоторое время перед этим из центра управления должна была поступить разрешающая команда. На связи с астронавтами был Майкл Коллинз, который в момент времени $T +$ 002:27:22 (т. е. через 2 часа 27 минут и 22 секунды после старта) произнес: «Отлично, "Аполлон-8", есть готовность к переходу на траекторию к Луне, конец связи» (All right, Apollo 8. You are go for TLI, over). Это довольно техническая, сухая фраза, которую он к тому же многократно тренировался произносить (не ради улучшения своей дикции, а как часть тренировки в центре управления, где систематически моделировались всевозможные неисправности и отрабатывались действия по их диагностике и преодолению). Но она произвела на Коллинза впечатление, сравнимое с впечатлением от его собственного полета к Луне семь месяцев спустя:

> И вот наступил серьезный момент. Пока мы вели обратный отсчет до включения двигателя [третьей ступени], чтобы выполнить TLI, безмолвие охватило центр управления. Из-за TLI этот полет отличался от предшествовавших ему шести полетов проекта «Меркурий», десяти «Джемини» и одного «Аполлона», отличался от любого путешествия, когда-либо предпринимавшегося людьми на каком бы то ни было транспортном средстве. Впервые в истории человек собирался ускорить себя до скорости освобождения, разорвать хватку гравитационного поля Земли и, как никто никогда не делал раньше, вылететь накатом в открытый космос. После TLI в Солнечной системе должны были появиться трое людей, которых следовало учитывать отдельно от остальных миллиардов, – трое, находящихся в другом

> месте, движение которых подчиняется другим правилам и среду обитания которых надо считать отдельной планетой. Они могли оглядывать Землю, а Земля могла глядеть на них, и каждая из сторон видела бы другую впервые. Люди в центре управления все это понимали; но не нашлось никаких специально написанных слов, чтобы выразить этот факт. Вместо них была только тонкая зеленая линия, показывающая, как «Аполлон-8» карабкается вверх, набирает скорость и исчезает, оставляя всех нас, застрявших на этой планете, в благоговении оттого, что мы, человечество, в конце концов получили возможность выбора – улететь или не улететь – и выбрали первое.

Я слышу здесь те же мотивы, что, видимо, подсказали название «Первая космическая ракета» ее создателям. Хотя к моменту ее запуска (январь 1959 г.) в космосе уже побывало четыре искусственных спутника Земли, уход *от* Земли, будь то к Луне или дальше, воспринимался, вероятно, как полет в «настоящий космос».

Включение двигателя «Аполлона-8» было рассчитано так, чтобы корабль перешел на вытянутую эллиптическую орбиту. После 5 минут и 17,72 секунды работы двигателя законы Ньютона вступили в свои права без усложнений со стороны реактивной тяги: движением управляла гравитация. Луна находилась в этот момент еще в удалении от места дальнейших главных событий. Если бы ее не было вовсе, вытянутый эллипс таковым бы и остался: «Аполлон-8» прошел бы его целиком (а потом снова и снова, пока не включил бы двигатель). Однако все мероприятие было затеяно ради встречи с Луной, которая сама не стоит на месте, а движется по орбите вокруг Земли.

****

Центр масс. Строго говоря, Луна обращается не точно вокруг Земли (а Земля, в свою очередь, – не точно вокруг Солнца), даже если понимать «обращается вокруг тела *X*» как «движется по эллипсу, в фокусе которого находится центр тела *X*».

Земля и Луна в своем взаимном движении обращаются вокруг определенной точки, которая по факту находится внутри Земли, но не совпадает с ее центром. Она называется центром масс и для двух тел одинаковой массы находится точно посередине отрезка, соединяющего эти тела; для неодинаковых тел центр масс смещен из середины в сторону более массивного тела. Для примерно сферических тел, таких как Луна, планеты и звезды, все расстояния надо вычислять до центра каждого тела. Из-за того что Земля в 81,6 раза массивнее Луны, их общий центр масс расположен близко к центру Земли – настолько близко, что оказывается внутри Земли, на расстоянии около 4600 км от центра (тогда как радиус Земли – 6378 км).

Центр вращения – центр масс

Если бы у Земли было два спутника – Луна и, скажем, Селена, то все три обращались бы вокруг *общего* центра масс. В зависимости от массы и удаления Селены от Земли и (меняющейся) конфигурации всей системы трех тел он вполне мог бы выходить за пределы Земли. То же самое происходит в Солнечной системе: там *всё* обращается вокруг общего центра масс. Из-за того что Солнце во много раз массивнее, чем все планеты, вместе взятые, центр масс находится вблизи или внутри Солнца. Поскольку планеты в разное время располагаются по разным сторонам от Солнца, положение центра масс меняется, если смотреть с Солнца. Когда две самые массивные планеты, Юпитер и Сатурн, находятся примерно на одном радиусе, проведенном от Солнца, центр масс заметно сдвигается в их сторону; но когда они расположены по противоположным сторонам, их вклады в сдвиг центра масс по отношению к центру Солнца почти компенсируют друг друга. Самый большой вклад в сдвиг центра масс от центра Солнца дает Юпитер. Центр масс системы Солнце – Юпитер находится даже не внутри, а снаружи Солнца, хотя и близко к его поверхности – на расстоянии немного меньшем, чем четыре диаметра Земли; от центра Солнца это 744 196 км. А центр масс системы Солнце – Земля сдвинут от центра Солнца всего на 450 км. Вращение Солнца вокруг центра масс Солнечной системы – если какой-то далекий наблюдатель его зафиксирует – возможность установить наличие у Солнца планет при взгляде со стороны какой-нибудь другой звезды.

*****

Кто за рулем. Пока «Аполлон-8» летит к Луне, а двигатель выключен, корабль *падает* – находится в состоянии свободного падения, главный признак которого – невесомость[26]. Чтобы встреча с Луной произошла как запланировано, в программу полета входила коррекция траектории этого свободного падения к Луне. Для этого надо было точно определить параметры того «большого» эллипса, которому следовал корабль после TLI, вычислить необходимую поправку, превратить ее в точное время включения и выключения двигателя и передать эти данные экипажу/бортовому компьютеру. Коррекция, проведенная почти точно через 11 часов после старта, оказалась очень незначительной: двигатель включили всего на две секунды.

На второй день полета – когда скорость корабля уменьшилась в несколько раз, как и полагается при движении по вытянутому эллипсу (*что чувствовал бы Кеплер*!..), – расстояние от корабля до Луны стало сокращаться, из-за чего ее притяжение постепенно вступало в силу и «большой эллипс» все заметнее переставал быть эллипсом; для успеха всего путешествия требовалось хорошо понимать, как и насколько. Математически записать точное решение для такой траектории невозможно, но человечество не сидело 250 лет после «Начал» Ньютона сложа руки, а разработало набор способов получать приближенные формулы, а за два десятилетия, предшествовавшие полету, более того, научилось поручать вычисления в каждом конкретном случае компьютеру – развив для этого специальные схемы вычислений.

Через 55 часов и 38 минут полета «Аполлон-8» оказался в точке, где притяжение Земли и притяжение Луны равны по величине. Из-за разницы масс Земли и Луны происходит это там, откуда до Луны в $\sqrt{81,6} \approx 9$ раз ближе, чем до Земли[27]. После этого Луна стала забирать корабль себе. Если бы притяжение Земли вдруг волшебным образом исчезло, то окололунной орбитой (как она видится наблюдателю на Луне) стала бы в точности гипербола (прилетел – отклонился – улетел), а в реальности получалось что-то вроде гиперболы, несколько испорченной влиянием Земли[28]. Но в любом случае оставаться на ней не было частью плана. Задание состояло в том, чтобы перейти на низкую, почти круговую окололунную орбиту. Для этого сначала провели небольшую промежуточную коррекцию траектории, а затем, в момент T + 068:04:07, экипаж получил одобрение на LOI (Lunar Orbit Insertion) – включение двигателя для вывода корабля на окололунную орбиту. Здесь требовалось *притормозить* – уменьшить скорость свободного падения мимо Луны.

Разгоняться и тормозить в открытом космосе – действия совершенно одного порядка, потому что оба выполняются путем включения двигателя, и именно время этого включения (и, разумеется, тяга двигателя в соотнесении с массой корабля) определяет изменение скоро-

[26] Мы встретимся со свободным падением в космосе на одной из более поздних прогулок и рассмотрим его в разнообразных подробностях. Стоит сразу оговориться, что оно почти никогда не является равноускоренным, его скорость изменяется во времени более сложными способами (равноускоренное падение происходит только тогда, когда сила притяжения не меняет величину и направление, а это условие, *строго* говоря, не выполнено никогда, хотя с хорошей точностью имеет место вблизи поверхности планеты или звезды).

[27] Причина появления тут квадратного корня – закон обратных квадратов для тяготения. При этом расстояния надо брать до центра каждого небесного тела.

[28] В качестве дополнительной меры безопасности корабль был исходно направлен по траектории свободного возвращения – так, чтобы при невозможности дальнейших маневров он, обогнув Луну, вернулся бы к Земле.

сти, которое в результате получится. Не имеет никакого значения, с какой скоростью двигался космический корабль до того. Если мы с вами летим рядом параллельными курсами на двух посудинах *в открытом космосе* и я включаю двигатель на 10 секунд, а вы нет, то я удалюсь от вас на одно и то же расстояние независимо от того, в направлении какой звезды я пожелал двигаться. Если эта звезда у вас впереди по курсу, то вы скажете, что я разогнался, если же сзади по курсу – то затормозил[29]. Мне же и разгон, и торможение, как и уход в любую сторону с одним и тем же по величине изменением скорости, стоят одинаковых затрат топлива.

Разгон и торможение в открытом космосе – одно и то же

Однако эффект, который производит на *орбиту* корабля приобретение им фиксированной прибавки к скорости, зависит от степени приближения к главному на текущий момент телу – тому, вблизи которого корабль движется. Для эффективного расхода страшно дорогого топлива (дорогого, разумеется, не из-за стоимости аэрозина и окислителя как таковых, а из-за расходов по их доставке к месту использования) маневр LOI – торможение – требовалось выполнить в точке наибольшего приближения к Луне. Но эта точка орбиты располагалась *за* Луной, где корабль был лишен связи с Землей. Центр управления оставался в неведении относительно успеха или неуспеха маневра до момента появления корабля из-за Луны – по правильной (в случае успеха) или неправильной траектории. Двигатель включился в момент *T* + 069:08:20,4 и проработал 4 минуты и 6,9 секунды. В центре управления прекрасно знали, что если двигатель сработал правильно, то связь не просто восстановится, но и произойдет это в рассчитанный заранее момент. Поэтому уже само появление «Аполлона-8» в эфире в момент *T* + 069:33:52 говорило, что двигатель отработал штатно. Сначала корабль вышел на эллиптическую орбиту вокруг Луны, которую чуть позже «циркуляризировали» – превратили в почти круговую путем десятисекундного включения двигателя. Таким образом, преодолев около 384 000 км до Луны, «Аполлон-8» поместил себя на орбиту всего в 110 км над поверхностью этой движущейся мишени – неплохое достижение с учетом того, что за все 66 часов после TLI свободное падение прерывалось включением двигателя в общей сложности не более чем на пять минут.

Потеря и восстановление связи, по наблюдениям экипажа, происходили *точно* в те моменты, когда их ожидали согласно информации из центра управления. Надо ли говорить, что такое предвидение – просто еще один результат расчетов по Ньютону. Участники событий прекрасно это понимали. Описывая уже свой собственный полет к Луне, через семь месяцев после того, как дорогу туда проложили Борман (командир), Андерс и Ловелл на «Аполлоне-8», Коллинз вернулся мыслями к тому времени, когда сам он был связным между центром управления и тремя только что упомянутыми астронавтами «Аполлона-8». Текущее же время в рассказе – первый день Коллинза вместе с Армстронгом и Олдрином на «большом» эллипсе на пути к Луне; дел не очень много, а напряжение велико.

> Помню, как в прошлом декабре, во время полета «Аполлона-8», мой пятилетний сын задавал один и только один, но весьма конкретный вопрос: а кто у них за рулем? Не его ли это друг мистер Борман? Как-то вечером, когда в центре управления было тихо, я переадресовал его вопрос на борт, и Билл Андерс сразу ответил, что нет, за рулем не Борман, а Исаак Ньютон. Нельзя дать более верного и более четкого описания полета между Землей и Луной. Солнце притягивает нас, Земля притягивает нас, Луна притягивает нас – точно так, как это предсказал Ньютон. Откликаясь на эти центры притяжения, наша траектория отклоняется от своих

---

[29] Несколько неожиданные последствия действий по изменению *орбиты* обсуждаются далее на этой прогулке. Там все намного интереснее.

начальных направления и скорости, полученных после TLI. На данный момент продолжает доминировать притяжение Земли, но к концу завтрашнего дня ее заменит Луна, и наша скорость снова начнет увеличиваться. До того нам необходимо слегка скорректировать наш маршрут, поскольку все это время после TLI мы медленно дрейфовали в сторону. На три короткие секунды включения двигателя служебного модуля Майк Коллинз сменит за рулем сэра Исаака Ньютона. Всего-то на три секунды! Я поражаюсь точности нашего путешествия, которое не перестают сравнивать с путешествием Колумба. Насколько я помню, по мере того как его экипаж выказывал все больше нетерпения из-за того, что земля никак не появлялась, и возрастало давление, чтобы повернуть назад, Колумб вроде бы подправил корабельный журнал так, чтобы из него следовало, будто «Нинья» ушла не так уж далеко, и поэтому вполне естественно, что земля еще не появилась в виду. Попробуйте представить себе, как я подправляю наш полетный план в случае, если бы Луна оказалась дальше, чем на расстоянии трехдневного путешествия. Что бы я сообщил компьютерам в Хьюстоне?

Рис. 2.2. «Восход Земли», видимый с борта «Аполлона-8». Фотография сделана Биллом Андерсом, по настойчивой просьбе которого Джим Ловелл быстро нашел цветную пленку. Ориентация корабля оказалась благоприятной для такого вида на четвертом по счету выходе из-за Луны. Один из запечатленных на фотографиях кратеров на поверхности позднее получил название «Андерсовский восход Земли» (Anders′ Earthrise)

События на лунной орбите «Аполлона-8» по-своему замечательны, но не являются здесь предметом нашего интереса (см., впрочем, рис. 2.2). Все это время драматическим вопросом было предстоящее возвращение. Для этого двигатель должен был снова включиться в точности в нужный момент, на нужное время и при нужной ориентации корабля – и снова за Луной, в период отсутствия связи с Землей. Экипаж получил рутинное напоминание о предстоящем включении двигателя, хотя *этот* маневр не относился к разряду «центр управления решит по обстоятельствам, выполнять или нет», – маневр Trans Earth Injection, переход на траекторию возвращения к Земле, *нужно* было выполнить. Двигатель *должен* был проработать под управлением бортового компьютера точно 3 минуты и 23,7 секунды. Полученная прибавка к скорости должна была заставить корабль уйти от Луны (перейти на гиперболическую траекторию, если говорить только о Луне) и вернуться в область доминирующего притяжения Земли. Маневр был несколько более ответственным, чем попадание на скоростном шоссе на нужную полосу, которая на следующей развязке уведет вас на запад, а не на юг. Запасного двигателя не было, как не было и никакого плана Б; никакая «Пинта» или «Санта-Мария» не пришла бы на помощь потерявшей ход «Нинье», и никакие ветра не прибили бы ее к берегу. Включение произошло в момент T + 089:19:16,6, но знали об этом только три человека, лишенные возможности с кем бы то ни было этим поделиться. В центре управления и в домах астронавтов в вынужденном полном бездействии 15 минут ждали возобновления связи и информации о том, как сработал двигатель.

*****

Космические парковки XVIII века. Один из двух последних (на момент написания книги и, боюсь, еще на какой-то период) людей на Луне, геолог Харрисон «Джек» Шмитт (первый астронавт NASA, не бывший профессиональным летчиком), одно время агитировал за посадку на обратной стороне Луны. Мы помним о невозможности радиообмена с теми, кто закрыт Луной. Для связи с кораблем пришлось бы запустить ретрансляционный спутник. Куда и как? Можно ли запустить космический аппарат так, чтобы он, не тратя или почти не тратя топлива, все время находился вблизи Луны, но *не обращался* бы вокруг нее (ведь иначе сам он периодически не будет видеть место посадки)?

Временно забудем про удобство радиосвязи и спросим себя: «*Можно ли, не тратя топлива, летать на постоянном расстоянии от Луны, но не обращаясь вокруг нее?*» Уже законы Кеплера (и, само собой, законы Ньютона) говорят, что тут есть проблема: чем больше радиус орбиты, тем больше времени занимает оборот вокруг Земли. Если запустить космический аппарат по орбите большего радиуса, чем орбита Луны, то он будет отставать от Луны; если поместить его на более близкую орбиту, то он будет убегать вперед. И в том и в другом случае получатся космические догонялки – расстояние между кораблем и Луной будет меняться с течением времени.

Оказывается тем не менее, что в околоземном пространстве есть пять орбит, по которым космические аппараты могут (или почти могут, как мы сейчас увидим) летать вокруг Земли, оставаясь неподвижными относительно Луны! Они называются точками (не орбитами, а именно точками) Лагранжа. За 185 лет до первого искусственного спутника Земли их описал Жозеф Луи Лагранж (родившийся в Турине и звавшийся от рождения Джузеппе Лодовико Лагранджиа) в своей математической статье о задаче трех тел. Три точки из этих пяти были открыты ранее Эйлером. Эти точки – все возможные ответы на поставленный выше вопрос. Вот подсказка к решению: попробуем сначала поместить космический аппарат на одну линию с Землей и Луной. Различных вариантов расположения Земли, Луны и спутника тогда три: ЗЛС, ЗСЛ и СЗЛ. Вариант ЗЛС означает, что спутник расположен на одной линии с Землей и Луной, но *за* Луной, если смотреть с Земли (точка L_2 на рис. 2.3). При этом Луна тянет спутник точно в ту же сторону, что и Земля, и, *пока спутник остается* точно на линии, соединяющей Землю и Луну, ничего другого Луна для него не делает: она работает как усилитель притяжения к центру масс (который тоже находится на линии, соединяющей Землю и Луну). А по законам Ньютона более сильное притяжение означает, что спутник движется по орбите быстрее, чем если бы действовало только притяжение Земли. Это отличная идея, если только удастся двигаться *ровно настолько* быстрее, чтобы все время оставаться на заветной линии Земля – Луна: такое расположение будет поддерживать то самое «усиленное» притяжение к центру масс, благодаря которому спутник может лететь так быстро, чтобы все время оставаться за Луной, благодаря чему продолжать испытывать более сильное притяжение к центру масс… Эта «история про курицу и яйцо» выражается уравнениями, решение которых и нашли сначала Эйлер (1760), а потом Лагранж (1772): точка L_2, где все складывается так удачно, существует! На ней и основано решение проблемы ретрансляционного спутника – с небольшим уточнением, которое будет сделано чуть ниже.

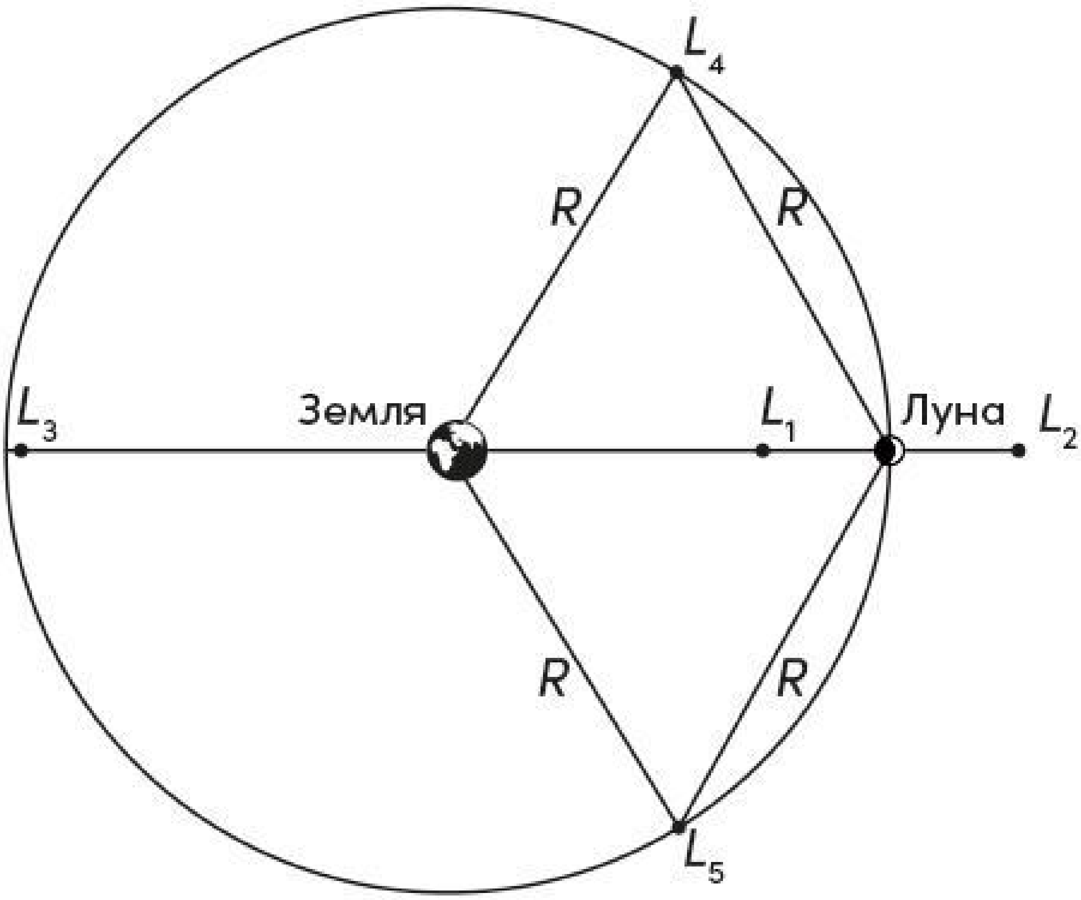


Рис. 2.3. Точки Лагранжа $L1$ – L_5 в системе Земля – Луна

Другой интересный вариант – ЗСЛ, что означает спутник *между* Землей и Луной. На этот раз Земля и Луна тянут спутник в разные стороны: с точки зрения спутника это означает, что притяжение к центру масс слабее, чем если бы его притягивала одна только Земля. А это, в свою очередь, означает, что он летит по орбите выбранного радиуса медленнее, чем полетел бы в отсутствие Луны. Снова появляется надежда на успех, потому что «медленнее, чем обычно» – это как раз то, что требуется, ведь и спутник находится ближе к центру вращения, чем Луна. Мы снова ищем такую точку, где разность двух сил притяжения позволяет, находясь ближе к Земле, чем Луна, не обгонять Луну, а оставаться на линии Земля – Луна, из-за чего две силы притяжения продолжают вычитаться, из-за чего скорость движения по орбите меньше, чем если бы Луны не было, из-за чего тело все время остается на линии Земля – Луна, из-за чего оно испытывает настолько меньшую силу притяжения к центру, что движется ровно настолько медленнее, чтобы… Эта «самозацикливающаяся» фраза снова описывает уравнение. Математический факт с непосредственным приложением к космонавтике состоит в том, что решение у этого уравнения есть, и оно определяет единственную точку между Землей и Луной – точку L_1 на рис. 2.3. Это – подходящее место для космической базы: прекрасные условия радиосвязи и с Землей, и с Луной плюс определенные удобства путешествия к обоим телам. Это, собственно говоря, перевалочная точка: имея целью Луну, но долетев с Земли сначала на L_1, мы дополнительно потратимся на эту «остановку» очень незначительно. Поэтому отсылать, например, грузы в L_1 и хранить их там до момента, когда они понадобятся на Луне, можно практически без лишних затрат топлива по сравнению с прямой доставкой, но имея при этом преимущество в логистике.

L_1 – перевалочная точка

Наконец, вариант СЗЛ означает, что спутник находится с противоположной стороны от Земли, чем Луна. И Земля, и Луна притягивают его в сторону центра масс системы Земля – Луна, т. е. в сторону центра вращения; притяжение Луны при этом сказывается слабо из-за большого расстояния до нее, но все же немного добавляет к притяжению в сторону центра масс (и главное – не утягивает спутник куда-то в сторону). Опять-таки требуется решить уравнение, говорящее, что совместное притяжение Земли и Луны позволяет обращаться вокруг Земли синхронно с Луной; этим однозначно определяется расстояние от центра масс (а потому и от центра Земли). Это точка L_3 на рис. 2.3. Она оказывается совсем немного дальше от центра масс (примерно в 1,017 раза дальше), чем Луна, но немного ближе к центру Земли, чем расстояние от него до Луны.

Разумеется, точки Лагранжа имеются не только в системе Земля – Луна. Неважно, как называются два массивных тела, – математика одна и та же, только относительные расстояния от центра до L_1, L_2 и L_3 несколько различаются в зависимости от соотношения масс двух больших тел. В системе Солнце – Земля практически важны две точки Лагранжа: уже знакомая нам L_2 (дом для космических телескопов, как мы очень скоро увидим) и L_1 между Солнцем и Землей (рис. 2.4). Из точки L_1 в системе Солнце – Земля открывается ничем не затемняемый постоянный вид на Солнце с одного и того же расстояния, и там работают приборы, которые именно в этом и нуждаются. Среди них – космическая обсерватория по наблюдению Солнца SOHO (Solar and Heliospheric Observatory Satellite). Другой аппарат, ACE (Advanced Composition Explorer), использует особенности этой точки Лагранжа, пожалуй, в еще большей мере: находясь «вверх по течению» от Земли вдоль потока солнечного ветра, он в реальном времени передает данные о магнитном поле и о потоке частиц, летящих от Солнца, что позволяет уточнять прогнозы космической погоды – влияния Солнца на околоземное пространство (магнитосферу и ионосферу). На смену этому ветерану точки L_1 уже запущен аппарат DSCOVR (Deep Space Climate Observatory), по совместительству – автор известных фотографий, показывающих прохождение Луны на фоне Земли.

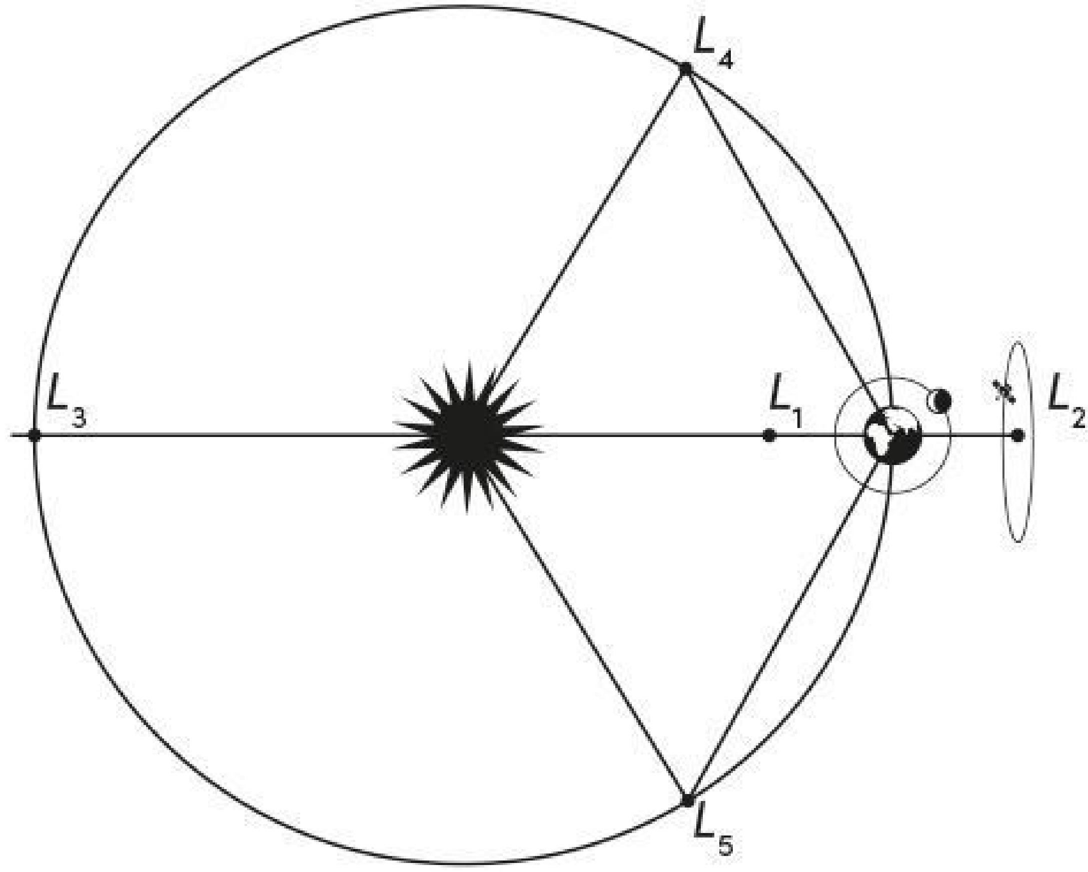


Рис. 2.4. Точки Лагранжа L_1 – L_5 в системе Солнце – Земля. Здесь изображено, по существу, то же самое, что на рис. 2.3, но для другой пары небесных тел. Луна на *этом* рисунке не играет никакой роли

Точка L_3 в системе Солнце – Земля (см. рис. 2.4) не нашла себе практических применений (и правда, чего ради стоило бы тащиться в такую даль?), но оказалась богатой темой для фантастических нарративов разного рода; не счесть замышляющих что-то инопланетян или других заговорщиков, желающих там обосноваться. Впрочем, трудно оспорить высказывание, что *если* какая-то развитая цивилизация [существует и] имеет цель не просто присутствовать в Солнечной системе, но еще и пребывать на фиксированном расстоянии от Земли и *если* при этом они желают оставаться на своем корабле, не высаживаясь на поверхность, но не хотят тратить много топлива, – то лучшего места, чем лагранжевы точки, не найти. Но на меня производит, пожалуй, большее впечатление не предполагаемый галактический заговор, а тот факт, что к моменту начала космических полетов они (эти зеленые человечки), без сомнения, открыли бы все пять этих точек, уж не знаю, как они там у них называются.

Впрочем, мы еще не знаем, что такое точки L_4 и L_5, у нас открытые Лагранжем в дополнение к первым трем, известным Эйлеру. Определить их положение, когда ответ уже известен, легче легкого: измеряем расстояние от Солнца до Земли и воображаем равносторонний треугольник, одна из сторон которого как раз и соединяет Солнце и Землю (см. рис. 2.4). У равностороннего треугольника все стороны *равны*, поэтому расстояния от его третьей вершины до Солнца и до Земли одинаковы. Это важно! В этой вершине притяжение Солнца во столько раз сильнее, чем притяжение Земли, во сколько раз Солнце массивнее. А дальше следует несложное упражнение в геометрии: две такие силы притяжения складываются так, что в итоге тело в точке L_4 испытывает суммарную силу, направленную в точности к центру масс системы Солнце – Земля, а по величине эта сила ровно такая, чтобы поддерживать обращение вокруг этого центра масс на заданном расстоянии – на том самом, которое определяется из нашего треугольника. С точкой L_5 все то же самое, только если L_4 опережает Землю в ее движении вокруг Солнца, то L_5 отстает. Обе – на один и тот же угол в 60°.

Точки Лагранжа – это некеплеровы орбиты

Итог про точки Лагранжа: это такие положения в системе двух тел, где совместное притяжение этих тел способно поддерживать *синхронное обращение* малого третьего тела. Это ответ на заданный выше вопрос, но слово «точка», как мы видим, понимается тут несколько вольно: каждая из точек Лагранжа вообще-то задает *орбиту*, потому что вся картинка на рис. 2.4 вращается как единое целое; это буквально точка только для наблюдателя, который сам обращается вокруг общего центра масс – скажем, сидя на Земле, если мы говорим о системе Солнце – Земля. И еще я забыл сказать, что вся схема работает хорошо, когда орбиты в системе двух тел близки к круговым. И конечно, помещать на эти орбиты следует тела малой массы; такое условие означает, что притяжение этого третьего тела не должно оказывать обратного воздействия на два больших тела (Солнце и Землю в данном случае). И наконец, пояснения требует слово «поместить»: все тела, помещенные в какую-либо точку Лагранжа, должны быть разогнаны до необходимой скорости для движения по орбите, которую описывает выбранная точка Лагранжа, когда конфигурация, изображенная рис. 2.4, вращается как целое. Этого разгона совместное тяготение двух больших тел совсем никак не обеспечивает – но оно обеспечивает ровно такое притяжение к центру вращения, при котором тела, получившие подходящую скорость, могут оставаться на этой орбите.

****

Гало-орбиты. Идея высадиться на обратной стороне Луне в начале 1970-х реализована не была, Сернан и Шмитт прилунились на «Аполлоне-17» на видимой стороне Луны и три дня ездили там на ровере; но китайский аппарат «Чанъэ-4», который в самом начале 2019 г. доставил луноход «Юйту-2» на обратную сторону Луны (рис. 2.5), вел связь через спутник «Цюэцяо», заблаговременно отправленный к той самой точке L_2 системы Земля – Луна, в каких-то 64 500 км за Луной. Здесь наконец пора дать обещанное уточнение про ретрансляционный спутник. Каждый раз, когда мы слышим про космический аппарат «в точке Лагранжа», надо представлять себе что-то вроде орбиты вокруг точки Лагранжа.

Рис. 2.5. Луноход «Юйту-2» на обратной стороне Луны. И его, и Землю постоянно видит ретрансляционный спутник, находящийся вблизи точки Лагранжа L_2 системы Земля – Луна

Дело в том, что с точками Лагранжа все-таки есть проблема: L_1, L_2 и L_3 неустойчивы[30]. Карандаш может некоторое время стоять вертикально на вашем столе, но рано или поздно упадет по той или иной причине, например если вы откроете окно или из-за какой-то еще флуктуации. Для космического аппарата, помещенного в точку Лагранжа, причин для подобных флуктуаций – нарушений точного баланса положения, скорости и сил притяжения – хоть отбавляй (притяжение других тел в Солнечной системе оказывает воздействие, орбиты отличаются от круговых, скорость оказывается не идеально точной для пребывания в точке Лагранжа и т. д.). В результате аппарат начинает «сползать» – удаляться от математически определенной точки Лагранжа. Хотя события и будут развиваться намного медленнее, чем при опрокидывании карандаша, неустойчивость означает, что по мере сползания на космический аппарат действуют силы, уводящие его только дальше[31]. Поэтому начавшееся по любой причине спол-

---

[30] Это жаргон, которому непросто сопротивляться. Имеется в виду неустойчивость орбиты *тела*, помещенного в точку Лагранжа, – но изъясняться каждый раз с такими подробностями едва ли возможно.

[31] Пример обратной ситуации: шкаф, стоящий в вашей комнате, надо надеяться, устойчив, потому что *малые* наклоны не приводят к его опрокидыванию, наоборот – шкаф возвращается в исходное положение. Легкость «сваливания» из точки Лагранжа зависит от направления: при сдвиге в некоторых направлениях даже возникает сила, возвращающая тело к точке Лагранжа, но при этом сдвиг в любом другом направлении неизбежно ведет к сваливанию. Картина хорошо описывается термином «седловина»: высыпанная на седловую поверхность крупа скатится вниз не по всем направлениям, но при небольшой встряске в конце концов упадет вся.

зание не исправится само; если там оказался астероид, то он со временем сдвинется куда-то прочь, а если мы (или инопланетяне) желаем, чтобы там оставалось какое-то устройство, то потребуются включения корректирующего двигателя. Да, некоторое количество топлива тратится, но очень небольшое – именно из-за того, что дело происходит вблизи точки равновесия с достаточно вяло проявляющей себя неустойчивостью. Космический аппарат, который время от времени заботится о своем положении, может поэтому описывать вокруг точки Лагранжа что-то вроде орбиты, но это орбита *не* в кеплеровском смысле, поскольку в сторону самой точки Лагранжа нет силы притяжения, а скорее контролируемый дрейф – сначала сползание в одну сторону, затем короткое включение двигателя для изменения направления движения, последующее сползание в несколько иную сторону и так далее. Китайский ретрансляционный спутник летал вокруг L_2 по такой орбите, чтобы Луна не загораживала ему вид на Землю. При взгляде с Земли эта орбита проходит снаружи от лунного диска, нигде не заходя за него, – как «гало» вокруг Луны. Поэтому такие орбиты иногда называют гало-орбитами.

Вариация на тему гало-орбит предполагается и для Лунной орбитальной платформы (Lunar Gateway) – международной космической станции «вблизи» Луны, создание которой планируется при ведущей роли NASA. Станция должна находиться на вытянутой гало-орбите, «чувствительной» к наличию обеих точек Лагранжа L_1 и L_2, с максимальным приближением к поверхности Луны на 3000 км (что несколько меньше диаметра Луны) и максимальным удалением 70 000 км. Станция будет приближаться к Луне над ее северным полюсом, а уходить далеко – над южным, что на взгляд с Земли можно изображать как *под* южным: орбита «свисает вниз», почти перпендикулярно плоскости, в которой сама Луна обращается вокруг Земли, и уходя сильно ниже этой плоскости. Это одна из *южных* орбит в отношении Луны, южный полюс которой тоже «смотрит вниз», и в течение почти всего времени, за исключением коротких периодов прохода над северным полюсом, станция будет находиться в прямой (радио)видимости от предполагаемого места высадки на Луну вблизи ее южного полюса. Для периодических «исправлений» орбиты потребуются включения двигателя, сообщающие станции суммарное изменение скорости всего на 10 м/с за год.

750

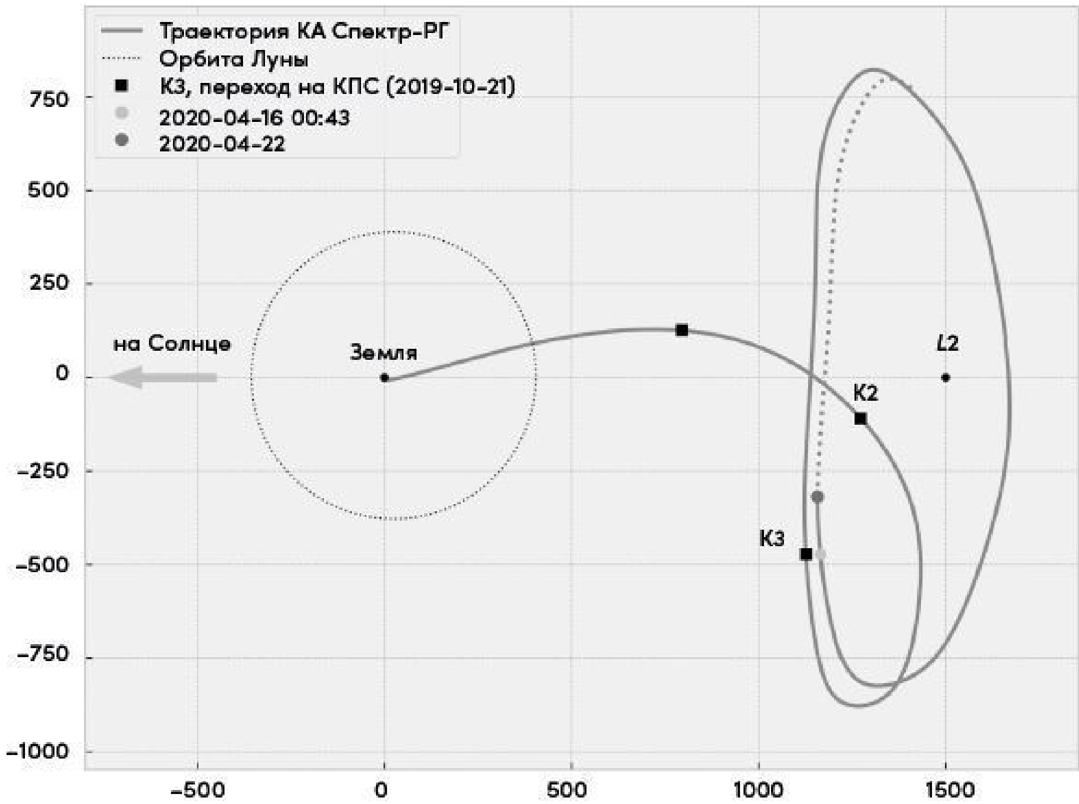


Рис. 2.6. Траектория аппарата «Спектр-РГ», работающего вблизи точки Лагранжа L_2 системы Солнце – Земля, данные ИПМ им. М. В. Келдыша РАН [25]

Если говорить про систему Солнце – Земля, то окрестности точки L_2 оказываются идеальной «движущейся парковкой» – площадкой для астрономических наблюдений. Эта точка Лагранжа расположена на расстоянии 1,5 млн км от Земли – что в сто раз меньше расстояния от Земли до Солнца, но все же в четыре раза дальше, чем находится от нас Луна. Именно из L_2 системы Солнце – Земля изучали реликтовое излучение (космический микроволновой фон) аппараты WMAP и «Планк»[32]. Относительно недавно там же поселился и «Спектр-РГ» – российско-германская астрофизическая обсерватория; аппарат, запущенный в июле 2019 г., за 100 дней добрался до окрестностей L_2, а к середине апреля 2020 г. выполнил один оборот по орбите, которая проходит на расстоянии до 400 000 км от L_2, перпендикулярно линии Солнце – Земля (рис. 2.6). Контроль за дрейфом в сторону от точки Лагранжа требует краткосрочных включений двигателя каждые 40–70 дней. В результате космический аппарат будет делать что-то вроде полного оборота в течение примерно полугода, поднимаясь над плоскостью земной

[32] Аппараты WMAP (NASA, 2001–2009) и «Планк» (Европейское космическое агентство ESA, 2009–2013) собрали фундаментальные данные о развитии Вселенной, сделав фактически «фотографию» ранней Вселенной, только-только остывшей до 3000 К, из-за чего электроны смогли удерживаться в атомах, а свет наконец смог распространяться. Мир не содержал тогда элементов тяжелее лития и ни единой звезды. Детали, которые испущенный в то время свет донес до космических аппаратов, выражаются в относительных вариациях в интенсивности величиной в несколько миллионных долей. Чтобы проводить измерения с такой чувствительностью, требовались тщательно продуманные условия.

орбиты и опускаясь под нее; траектория образует не очень аккуратный «моток» вокруг L_2, мало похожий на строгий и совершенный эллипс[33].

Туда же, в окрестность точки L_2 системы Солнце – Земля, в январе 2022 г. добрался преемник знаменитого космического телескопа «Хаббл» – JWST[34]. Его задачи – наблюдать самые далекие от нас объекты во Вселенной (интересные нам в первую очередь из-за эффекта «машины времени», который мы обсуждаем на прогулке 5), следить за формированием звезд и планет, а также получать прямые изображения планет (и отдельно – взрывающихся звезд). Телескоп требуется держать очень холодным, и совокупность предъявляемых требований и определила положение для его устойчивого размещения внутри «круговорота» Солнечной системы. Для него выбрана гало-орбита, проходящая на расстоянии от 250 000 до 832 000 км от точки L_2. Чтобы его солнечные батареи постоянно освещались, аппарат не должен попадать в тень, отбрасываемую Землей. При этом, однако, давление солнечного света на щит, защищающий телескоп от нагревания Солнцем, становится фактором воздействия, уводящим аппарат в сторону. Телескоп будет подправлять свое положение каждые три недели. Суммарное годовое изменение скорости, которое необходимо обеспечить, включая двигатель, составит от 2 до 4 м/с. Это чепуховые поправки по сравнению со скоростью движения самой L_2 вокруг Солнца, которая близка к скорости Земли в 30 000 м/с, и их малость определяется именно близостью аппарата к точке Лагранжа. То же самое верно, конечно, и в отношении аппаратов, наблюдающих за Солнцем и солнечным ветром «из точки» L_1: ценой очень скромных затрат топлива они описывают вокруг этой точки Лагранжа несколько нерегулярные орбиты с характерными радиусами в несколько сотен тысяч километров.

*****

Греки и троянцы. Лагранж умер за 144 года до запуска первого искусственного спутника Земли, и не исключено, что он рассматривал пять специальных точек в системе двух тел как (всего лишь) математическое упражнение. Но нам, забравшимся на плечи гигантов, теперь видно, что интересная математика, возникающая при описании какой-либо реальной физической системы, – это почти гарантия обнаружения физического эффекта, в котором математическая достопримечательность тем или иным способом себя проявляет. И действительно, спустя более столетия после рассуждений Лагранжа астрономы начали открывать *троянцев*!

Если для замышляющих что-то зеленых человечков точки Лагранжа – это хорошие места для парковки, то для космических обломков и мусора точки L_4 и L_5 оказываются тихими закутками, где они оседают. В этих точках Лагранжа *собираются* астероиды, потому что там иная картина с устойчивостью, чем в трех других точках Лагранжа. С первого взгляда, правда, ситуация даже хуже, потому что баланс сил притяжения таков, что при выходе из точки Лагранжа в любом направлении возникает сила, которая побуждает уходить дальше. Но это только если смотреть на то, как работают силы притяжения. Кроме притяжения, в дело вступает движение. Сама точка Лагранжа движется по окружности, а в этом случае есть вот какая новость: при движении относительно вращающейся системы тело испытывает действие дополнительной силы[35]. Это не совсем обычная сила, потому что у нее нет физического источника, она *ощущается* только во вращающейся системе и связана с довольно простым обстоятельством:

---

[33] Задачи аппарата «Спектр-РГ» – картирование Вселенной в рентгеновском диапазоне, наблюдение скоплений галактик и центральных черных дыр в галактиках, звезд и белых карликов, испускающих рентгеновское излучение. Возможности обсерватории должны существенно уточнить наше понимание эволюции Вселенной.

[34] James Webb Space Telescope, разработка NASA с участием ESA и Канадского космического агентства.

[35] Она называется силой Кориолиса; я произношу фамилию Кориолис с ударением на последнем слоге, но не знаю, правильно ли это.

если вы уже стоите на вращающейся карусели-платформе, то, значит, вы приобрели ту же скорость, что и пол у вас под ногами. Но разные участки пола движутся с разными скоростями! Те, которые близко к центру, движутся медленно, а те, что у края, – быстро или очень быстро. Когда вы начнете *двигаться* – скажем, захотите перейти от края карусели к центру, – вы обнаружите, что, делая каждый следующий шаг, вы ставите ногу на участок пола, движущийся медленнее, чем тот, где вы только что находились. В вашем восприятии это будет выражаться в некоторой силе, действующей на вас со стороны пола и направленной поперек вашего движения. То же самое происходит в «гравитационной карусели» в окрестности (для определенности) точки L_4: по мере удаления от L_4 уходящее тело набирает скорость относительно этой точки Лагранжа. Но, поскольку все происходит во вращающейся системе, движущееся тело испытывает дополнительное воздействие по мере набора скорости. Результат оказывается приятным сюрпризом: баланс всех факторов в окрестности L_4 таков, что при развитии сползания тело не уходит прочь, а, набрав некоторую скорость, отправляется по орбите вокруг точки L_4. Все то же самое происходит и в окрестности L_5. Точки L_4 и L_5 оказываются устойчивыми, если, как показывает математика, более массивное из двух больших тел тяжелее другого в $\frac{1}{2}\left(25+3\sqrt{69}\right) = 24{,}95993\ldots$ раза или больше. Это условие выполнено для пары Земля – Луна и с большим запасом выполнено для всех пар Солнце – планета.

Рис. 2.7. Земля и Юпитер, если бы они могли оказаться рядом

Раз оказавшись вблизи L_4 или L_5 в системе Солнце – планета, астероиды имеют тенденцию там и оставаться. Сильнее всего этот эффект проявляется, разумеется, в самой гравитационно сильной паре тел в Солнечной системе. Это Солнце и Юпитер (который в 317 раз массивнее Земли; рис. 2.7). В точках Лагранжа L_4 и L_5 системы Солнце – Юпитер собралось, по оценкам, около 1 млн астероидов, превышающих 1 км в диаметре (возможно, примерно столько же, сколько их в поясе астероидов между Марсом и Юпитером). Они названы именами участников Троянской войны и даже разбиты по лагерям:

L_4. Это лагерь греков. Застрявшие там астероиды носят, в частности, имена (начиная с тех, которые должны звучать хоть сколько-нибудь знакомо, если никуда не подглядывать): Ахилл, Нестор, Агамемнон, Одиссей, Аякс, Менелай, Филоктет, Неоптолем; а еще – Идоменей, Протесилай, Талфибий, Менесфей, Подалирий и многие другие. Но там же и Гектор – астероид, названный именем жителя Трои еще до того, как пробила себе дорогу идея номенклатурного разделения этих небесных тел на два враждующих лагеря, между которыми лежит треть орбиты Юпитера (больше полутора миллиардов километров).

L_5. Здесь совсем другая картина – это лагерь защитников Трои. Среди прочих тут обитают Приам, Эней, Главк, Сарпедон, Лаокоон, Парис, если снова начинать со знакомо звучащих имен, а кроме того, Алкафой, Пандар, Пулидам, Ифидам, Сергест, Астеропей и еще многие. Единство защитников Илиона тоже нарушено, еще до появления коня: к ним присоединился Патрокл.

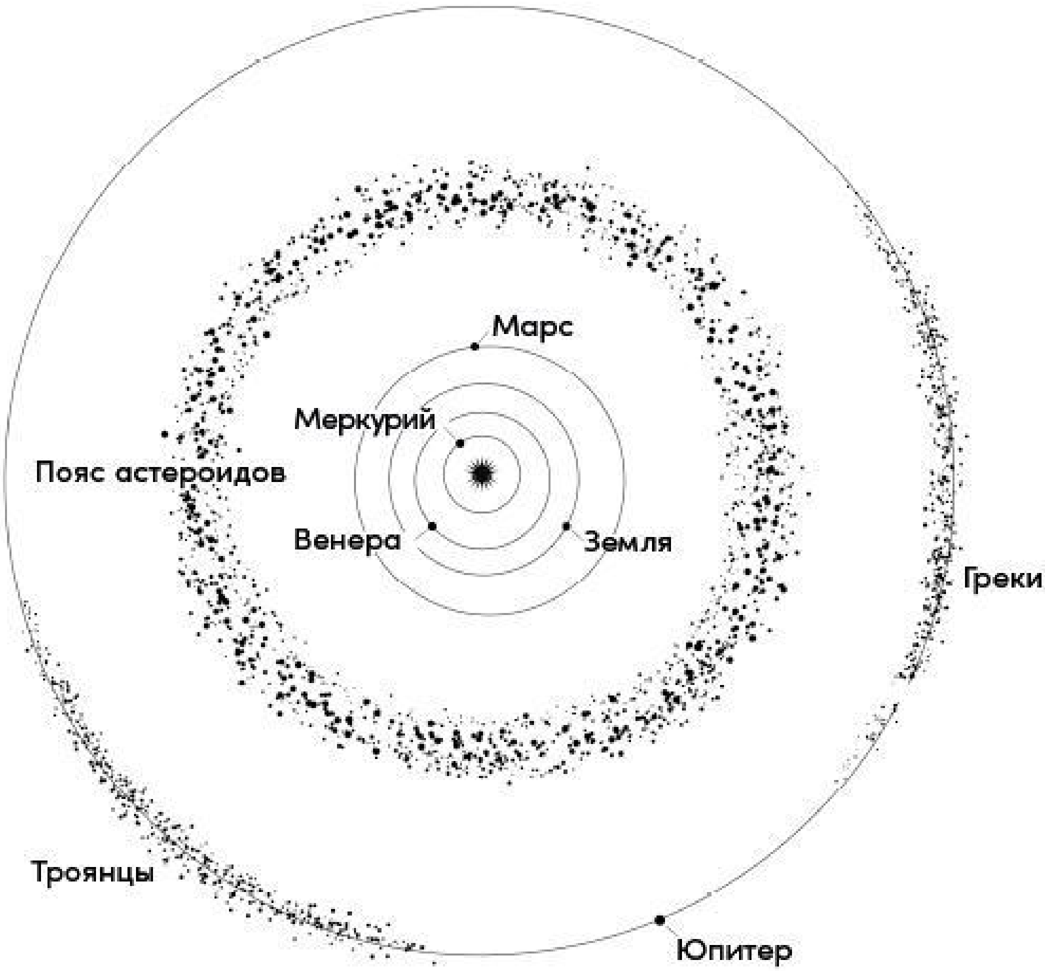


Рис. 2.8. Греки и троянцы по две стороны от Юпитера. Их разделяет расстояние, равное примерно десяти расстояниям от Земли до Солнца. Ближе к Солнцу, внутри орбиты Юпитера находится главный пояс астероидов

Гектор и Патрокл. Пребывание Гектора и Патрокла в «чужих» станах в парадоксальном смысле логично: именно Гектор убил Патрокла («Нет великого Патрокла! Жив презрительный Терсит!»), и только поэтому Ахилл вернулся на поле боя – где и сразил Гектора[36].

Разумеется, ни греки, ни троянцы не сосредоточены все в одной точке, а занимают некоторый участок вдоль траектории Юпитера. Происходит все это довольно далеко от Земли (рис. 2.8), поэтому открыты они были совсем не сразу. Слово «троянцы» используют также в отношении астероидов, скапливающихся вблизи точек L_4 и L_5 других пар Солнце – планета; поскольку Солнце – это всегда Солнце, говорят просто о троянцах, например, Нептуна или Сатурна. Слово относится и к опережающим, и к отстающим; одного эпизода Троянской войны на Солнечную систему достаточно.

[36] У Жуковского, переводившего поэму Шиллера, «презрительный» означает «презренный» или «презираемый»:Скольких бодрых жизнь поблекла!Скольких низких рок щадит!Нет великого Патрокла!Жив презрительный Терсит!

*****

Полет из пращи. Путешествия к астероидам и планетам – это относительно далекие путешествия, оказывающиеся долгими при доступных нам скоростях. Разогнаться быстрее нелегко: топлива хватает только на что-то вроде TLI – единовременный разгон при старте с околоземной орбиты; хорошо, если потом остается еще немного на маневры. Дефицит топлива определяется трудностью его доставки к месту использования. Реактивная тяга основана на том, что, выбрасывая что-то «назад», реактивный аппарат движется «вперед»; здесь важна скорость, с которой некоторый «агент» выбрасывается назад (в подавляющем большинстве реально существующих реактивных двигателей это горячий газ). Реактивный аппарат несет с собой источник энергии для этого «выбрасывания» – в современных ракетах это горючее (например, керосин или метан) и окислитель. Их соединение обеспечивает горение, при котором и выделяется энергия. И вот здесь скрыт ключевой момент: необходимость с самого старта нести с собой все топливо (горючее и окислитель), в том числе и тот запас, который понадобится на более поздних этапах полета. Не только «полезную нагрузку», но и это топливо необходимо *разогнать* на более ранних этапах движения, а для этого разгона требуется дополнительное топливо, которое, в свою очередь, необходимо разогнать, для чего нужно еще сколько-то топлива, и так далее. Это удручающее положение дел математически выражается формулой Циолковского – соотношением, которое на основе законов движения Ньютона говорит, какой должна быть стартовая масса ракеты, чтобы разогнать желаемую «полезную» массу до заданной скорости, выбрасывая продукты горения с заданной скоростью относительно ракеты. Удручающим здесь является *характер* этой зависимости: увеличение конечной скорости достигается колоссальным увеличением массы ракеты – т. е. количества топлива – при старте.

Формула Циолковского не очень оптимистична

Но пока наши топливные возможности существенно ограничены, в дальнем путешествии можно заметно увеличить скорость, отобрав *совсем ничтожную* часть количества движения у встреченной по дороге планеты. Для этого действия иногда употребляют звучное название «гравитационная праща» (есть и более технический термин: «гравитационный маневр»). Это остроумный способ извлечения пользы – разгона или, когда это нужно, торможения – из совместной игры гравитации и движения[37]. Первым космическим аппаратом, исполнившим гравитационную пращу, была «Луна-3», полетевшая в космос в 1959 г. как «Автоматическая межпланетная станция». Она не только впервые выполнила этот маневр, но и впервые сфотографировала обратную сторону Луны, что вызвало колоссальный интерес и было огромным достижением, несмотря на никудышное по современным стандартам качество успешно присланных 17 (из 29 сделанных) фотографий. Пытаясь представить себе ощущение чуда от первого за всю историю человечества взгляда на то, чего увидеть «нельзя», я думаю, что качество фотографий было не самым главным в общественном восприятии этого события. (Первыми же людьми, посмотревшими на обратную сторону Луны своими глазами, был экипаж «Аполлона-8».) Луна направила станцию обратно к Земле, а из-за движения самой Луны при встрече изменилась плоскость орбиты станции: она повернулась примерно вокруг линии Земля – Луна, проведенной в момент облета Луны (рис. 2.9). «Луна-3» ушла от Луны таким образом, чтобы при возвращении к Земле пролететь над Северным полушарием и передать фотографии на станции связи на территории СССР (что оказалось непросто из-за слабости сигнала). Она

[37] Идея об использовании попутных тел – например, спутников планет – для ускорения в дальних перелетах принадлежит пионеру космонавтики Ю. В. Кондратюку (под этим именем с 1921 г. жил А. И. Шаргей): он описал ее среди прочего в своей рукописи «Тем, кто будет читать, чтобы строить», написанной, вероятно, около 1919 г., но ставшей известной значительно позже.

вообще не имела маршевого двигателя, и весь этот полет требовалось рассчитать заранее (расчетами по Ньютону занималась команда под руководством Келдыша).

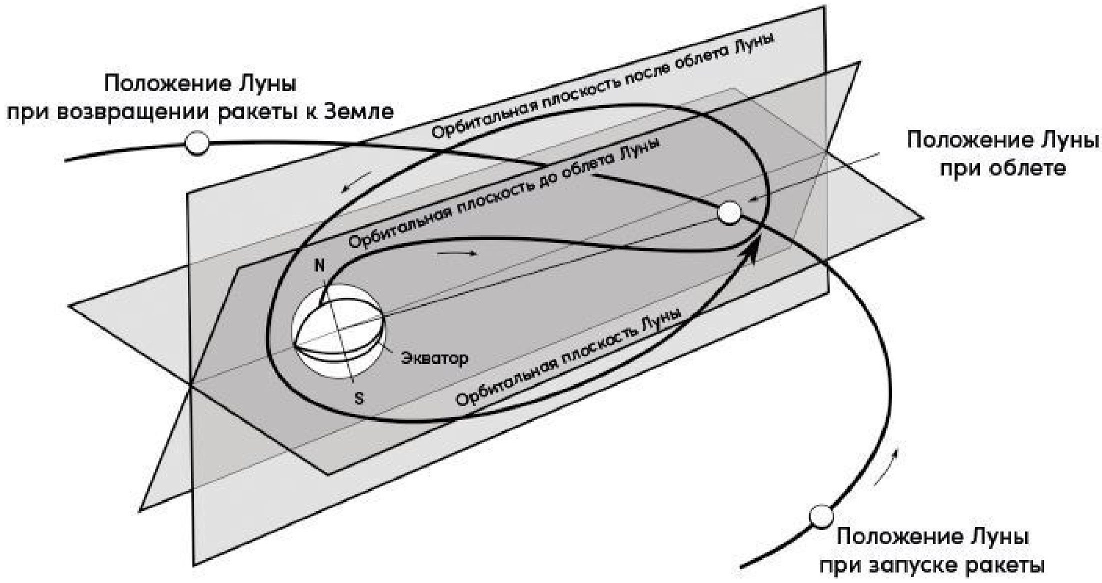


Рис. 2.9. «Луна-3», Земля и Луна. Гравитационный маневр

С тех пор гравитационный маневр применяли множество раз. «Вояджер-1», запущенный в 1977 г. (на 16 дней позже «Вояджера-2»), получил прибавку к скорости, позволяющую ему сейчас, когда вы это читаете, покидать пределы Солнечной системы с рекордной скоростью – около 61 000 км/ч, приобретенной в основном у Юпитера и Сатурна (рис. 2.10). В пересчете на космические масштабы это около 3,6 а.е./год. Без помощи планет «Вояджеры» не пролетели бы и полпути до своих положений на настоящий момент. 25 августа 2012 г. «Вояджер-1» стал первым искусственным аппаратом, вышедшим в *межзвездное* пространство, если проводить границу там, где попутный солнечный ветер наконец оказывается слабее встречного галактического ветра. Потребуются тем не менее еще *сотни* лет, чтобы он достиг расстояний, на которые уходят от Солнца наиболее далекие из идентифицированных тел Солнечной системы, такие как 2013 SY_{99}, Лелеакухонуа (первоначально известная как Гоблин) и 2014 FE_{72}.

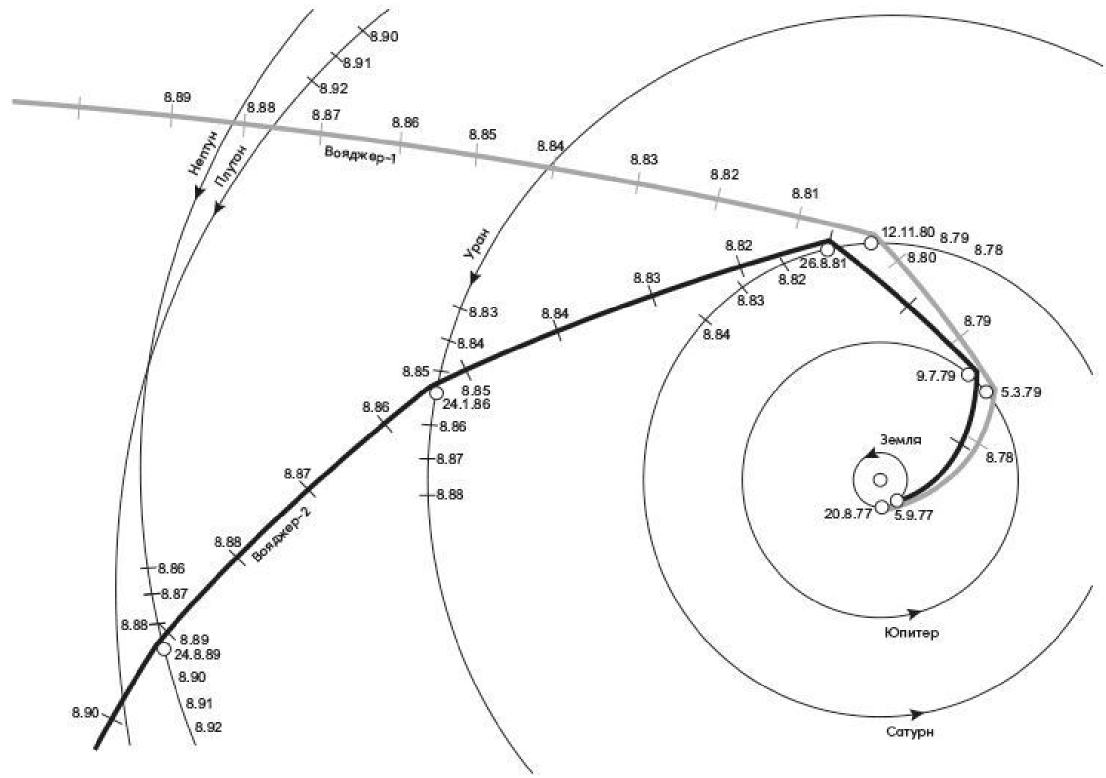


Рис. 2.10. Большие планеты изменяют траектории «Вояджеров», ускоряя их при этом. Засечками показаны точки траектории, в которых «Вояджеры» и планеты находились в определенные даты каждый год

Главное действующее лицо в истории про гравитационную пращу – гипербола (см. главу «прогулка 1»). Представим себе, что космический аппарат – скажем, запущенный с Земли – подлетает к Юпитеру достаточно быстро, со скоростью, которая не позволит Юпитеру оставить этот аппарат в зоне своего притяжения. Если временно забыть про притяжение Солнца, а кроме того, смотреть на происходящее, сидя на Юпитере, то картина хорошо известна: космический корабль приходит издалека по ветви гиперболы, отклоняется и уходит прочь. Приходящая и уходящая ветви гиперболы симметричны, и даже скорость движения при прощании с Юпитером такая же по величине, как скорость при сближении с Юпитером на том же расстоянии от него. Но это если смотреть с Юпитера! А если смотреть с Солнца, то движется не только сам аппарат, но и Юпитер, и скорость их сближения – это результат несложного математического действия со скоростями каждого. В начале всего эпизода мы пересчитываем скорость аппарата относительно Солнца в скорость сближения с Юпитером. В конце эпизода мы выполняем обратное действие: скорость удаления от Юпитера пересчитываем в скорость аппарата относительно Солнца. Казалось бы, это два взаимно противоположных действия: сколько сначала добавили, столько потом и вычли? Нет! Суть дела в том, что корабль *повернул* вокруг планеты: его скорость изменила направление. Поэтому скорость Юпитера, учитываемая на входе, и она же, учитываемая на выходе, не сокращают друг друга. Направлениями можно распорядиться так, что относительно Солнца корабль *ускорится* в результате пролета мимо Юпитера. В этом и состоит идея гравитационной пращи. Чуда в том, что корабль ускорился, «просто» пройдя мимо планеты, нет: дополнительная энергия движения относительно Солнца получена из энергии движения Юпитера; а сам он такого комариного укуса вообще не заметит (в расчетах с любой точностью можно считать, что скорость Юпитера не изменяется). Совсем наглядно происходящее видно из рис. 2.11, где, впрочем, ради этой наглядности пришлось кое-чем пожертвовать. Там предполагается, что космический корабль поворачивает вокруг планеты на 180°, чего *не* случается при движении по гиперболе: ее ветви расходятся все-таки под некоторым углом и никогда не бывают параллельными. Об изображенном на рисунке можно думать как о случае, к которому можно приблизиться, выбирая все более экстремальные гиперболы. Зато там все совсем просто со скоростями. Скорость корабля относительно Солнца v, а скорость планеты ему навстречу U, а тогда скорость сближения (скорость относительно Юпитера) равна $v + U$; после поворота на 180° она осталась численно равной $v + U$, но направлена в противоположную сторону – и это по-прежнему скорость относительно Юпитера. Однако теперь, после разворота корабля, Юпитер «несет» его по своей орбите, где сам имеет скорость U. Относительно Солнца скорость корабля получается равной $v + U + U = v + 2U$. Как видим, корабль приобрел две скорости Юпитера – как будто Юпитер был упругой стенкой, от которой корабль отразился, как теннисный мяч от приближающегося поезда. На реальных траекториях выигрыш меньше, да и к направлению вылетания из «пращи» надо относиться внимательно, если не все равно, куда потом лететь, но идея работает.

Гравитационная праща – обмен энергией движения с планетой

Аппарат «Кассини»[38], имевший целью работу на орбите Сатурна, был слишком тяжел, чтобы любая из имевшихся ракет-носителей могла отправить его сразу к цели. Стартовав в октябре 1997 г., «Кассини» сначала направился к Венере. Там в апреле 1998-го он получил прибавку в целых 7 км/с к скорости. В декабре того же года привезенное с собой топливо частично пошло на полуторачасовое включение двигателя для *торможения* на 450 м/с, что позволило аппарату в июне 1999-го второй раз пройти вблизи Венеры, которая направила его к Земле! Уже в августе 1999 г. родная планета встретила своего ускорившегося сына, подарив ему еще 5,5 км/с. С ними «Кассини» и отправился во внешнюю часть Солнечной системы, где сначала прошел мимо Юпитера, который еще немного «подтолкнул» его к цели, а 1 июля 2004 г. наконец вышел на орбиту Сатурна. (Дальнейшие приключения в ходе этой сверхуспешной миссии включали в себя посадку аппарата «Гюйгенс» на Титане, рискованные прохождения между кольцами и эпическое погружение вглубь планеты-гиганта 15 сентября 2017 г.)

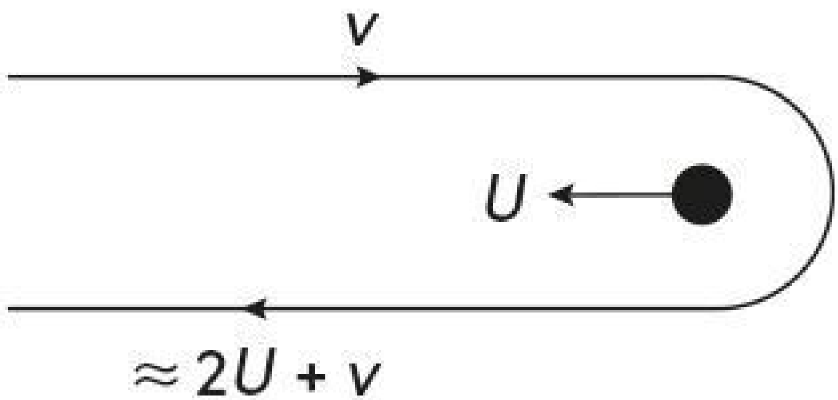


Рис. 2.11. Предельный (нереальный, но наглядный) случай гравитационной пращи. Нереальность состоит в предположении, что космический корабль разворачивается вокруг планеты на 180°, тогда как гиперболические траектории позволяют развернуться только на угол, меньший 180°. В изображенном предельном случае космический корабль приобретает две скорости планеты, как если бы он упруго отразился от движущейся стенки

[38] Правильное название – «Кассини – Гюйгенс»; это аппарат NASA, ESA и Итальянского космического агентства.

Распоряжаясь направлениями при исполнении гравитационной пращи, можно и уменьшить скорость аппарата относительно Солнца. Это тоже бывает нужно, например, чтобы запустить космический аппарат к Меркурию или «прямо на Солнце». Сделать это с Земли крайне непросто из-за скорости, с которой планета движется по орбите вокруг Солнца; эту скорость надо каким-то образом погасить, и один из способов – «праща наоборот» (в этом случае более сдержанно говорят о «гравитационном маневре») у Венеры. Правда, одного захода может не хватить, а это сильно удлиняет путешествие. Аппарат «Солар орбитер», запущенный к Солнцу Европейским космическим агентством 10 февраля 2020 г., будет двигаться к расчетной орбите вокруг Солнца около трех с половиной лет, совершая один за другим гравитационные маневры у Венеры и Земли (а затем Венера поработает еще и для того, чтобы наклонить плоскость его орбиты с целью лучшего обзора полюсов Солнца). И кроме того, гравитационный маневр около Земли выполняется в фильме «Марсианин».

*****

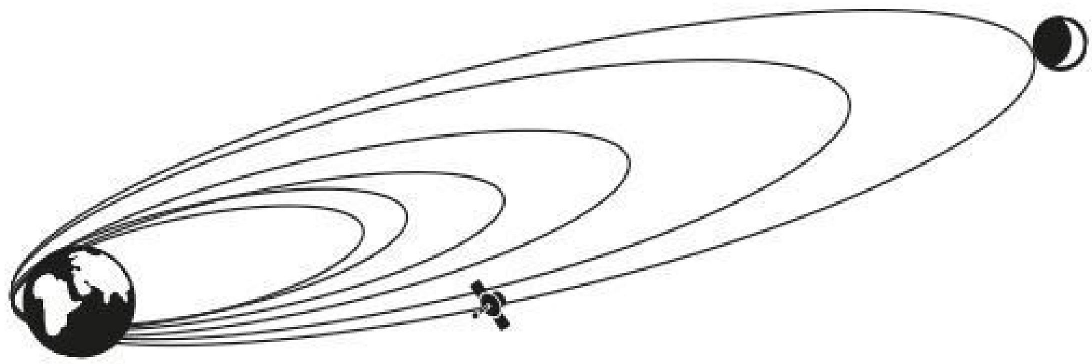


Рис. 2.12. Долгая дорога аппарата «Чандраян-1» к Луне: удлиняющиеся эллипсы

Где прибавить ходу. В последнее время к Луне часто летают «более долгой дорогой», экономя при этом самый дорогой ресурс – топливо (или, что то же самое, достигая большей скорости при заданном расходе топлива). Сочетание законов движения и гравитации предоставляет такую возможность при условии, что вы добираетесь до Луны *постепенно*, по траектории, представляющей собой букет из нескольких все более вытянутых эллипсов. Вместо одного TLI – включения двигателя на достаточное время, чтобы забросить корабль на траекторию полета к Луне, – корабль сначала, после недолгого включения двигателя, переходит на эллипс, вытянутый еще не сильно, и делает по нему полный оборот. В точке наибольшего приближения к Земле двигатель ненадолго включается снова, и корабль переходит на более вытянутый эллипс, снова делает полный оборот и снова включает двигатель вблизи Земли и так далее. Так, например, летала китайская миссия в 2007 г., индийская в 2008-м и израильская в 2019-м – все беспилотные. Экономия топлива по сравнению с «классическим» TLI требует времени на вычерчивание всех промежуточных эллипсов, что делает такой маршрут непригодным для пилотируемых полетов, поскольку экипажу в течение всего этого времени требуются кислород, вода, пища и тепло, а главное – многовитковая траектория многократно пересекает радиационные пояса Земли. В конце октября – начале ноября 2008 г. индийский аппарат «Чандраян-1» примерно за две недели перешел с орбиты с максимальным удалением от Земли 22 860 км на орбиту с максимальным удалением 380 000 км, включая для этого двигатель несколько раз, когда возвращался в точку наибольшего сближения с Землей (рис. 2.12). По итогам первого включения на 18 минут аппарат перешел на эллипс с максимальным удалением, которое оказалось на 15 040 км больше, чем у его орбиты до включения двигателя; при следующем сближении с Землей двигатель включили на 16 минут, что добавило к максимальному удалению на новом витке заметно больше – 36 815 км; но затем 9,5 минуты работы двигателя принесли целых 89 885 км, после чего всего 3 минуты подняли орбиту еще на 102 400 км, и, наконец, 2,5 минуты включения – еще на 113 000 км. Если «эффективность одной минуты включения» грубо измерять в терминах прибавки к максимальному удалению от Земли на витке «нового» эллипса, то эта эффективность растет с каждой следующей попыткой: от 15 040/18 = 836 до 113 000/2,5 = 45 200 км удаления на минуту работы двигателя. Цифры эти надо воспринимать лишь ориентировочно, потому что притяжение Земли слабеет с расстоянием и подняться с 207 000 до 307 000 км проще, чем с 7000 до 107 000; кроме того, при каждом следующем запуске двигателя ракета оказывается легче, а потому сильнее разгоняется при той же тяге. Но, как бы то ни было, тенденция ясна. Называется это явление эффектом Оберта, а сам маневр, состоящий в том, чтобы нырнуть к планете и включить двигатель в момент наибольшего сближения, – маневром Оберта. Выглядит все это с первого взгляда чуть подозрительно, потому что один и тот же двигатель, работающий одно и то же время, дает, конечно, одну и ту же *прибавку*

Конец ознакомительного фрагмента.