Относительность движения тела в разных системах измерения.

Исаака, и здесь можно было бы назвать множество известных имен (например, **Роберт Гук**, 1635–1703). Но объединить в одну стройную концепцию идею о силе притяжения и три экспериментально подтверждаемые закона Кеплера удалось только Ньютону.

Широко известна история о том, как яблоко (в одном из вариантов — упавшее прямо на голову Ньютона) привело его к мысли о существовании силы тяготения. Это, конечно, не так: то, что все предметы на Земле притягиваются к ней, люди осознали *задолго до Ньютона*.

Во времена Ньютона уже было понятно (это убедительно показал еще Галилей), что если на тело не действуют никакие силы, то тело будет двигаться прямолинейно и равномерно. Аристотель двумя тысячами лет раньше ошибочно полагал, что в таких условиях тело вообще не будет двигаться. Понятия инерции (способность тела сохранять скорость неизменной) в те времена еще не существовало. Кроме того, находится тело в покое или движется — зависит от наблюдателя. Так, например, с точки зрения водителя автомашины, сумка на сиденье покоится, а с точки зрения прохожего — она быстро перемещается вместе с автомобилем.

Исаак Ньютон, английский математик, физик, астроном и теолог, открыл силу тяготения.

Биограф Ньютона Уильям Стьюкли («Воспоминания о жизни Ньютона», 1752 год) сообщает: «Ньютон сказал мне, что мысль о гравитации пришла ему в голову, когда неожиданно с ветки упало яблоко. "Почему яблоки всегда падают перпендикулярно земле?" — подумал он».

Тем не менее по рабочим тетрадям Ньютона видно, что его теория всеобщего тяготения вовсе не была озарением, а развивалась постепенно. Сам Ньютон в одном из писем 1686 свою запись окончательной формулировки закона тяготения датирует лишь приблизительно: «более 15 лет назад».

Ньютон размышлял о движении Луны. Луна летит по своей орбите вокруг Земли. Со времен Кеплера было известно, что орбита представляет собой замкнутую кривую линию — эллипс. Если бы никакой силы не было, Луна двигалась бы равномерно и прямолинейно. Но эллипс — не прямая линия! И если Луна движется не по прямой, значит, на нее *действует какая-то сила*. Что это может быть за сила?

Раз Луна летает вокруг Земли, естественно было предположить, что источник этой силы связан с Землей.

Вблизи поверхности Земли предмет в свободном состоянии (например, то же яблоко), как и Луна, не движется равномерно: оно падает отвесно с ускорением, двигаясь к центру Земли. Раз есть ускорение, значит, опять работает какая-то сила. Это следует из закона, открытого тем же Ньютоном:

$$F = \vec{m}\,\vec{a},$$

где F — некая сила, $\vec{m}$ — масса тела, $\vec{a}$ — ускорение тела. Из формулы видно, что если сила не равна нулю, то не

равно нулю и ускорение. Наоборот: если нет ускорения, это значит, что результирующая сила, приложенная к телу, равна нулю.

Ньютон догадался, что сила, заставляющая Луну отклоняться от движения по прямой, и сила, заставляющая падать яблоко (а также прижимающая к полу самого Ньютона), — это *одна и та же* сила!

Это была гениальная догадка и абсолютно правильное решение.

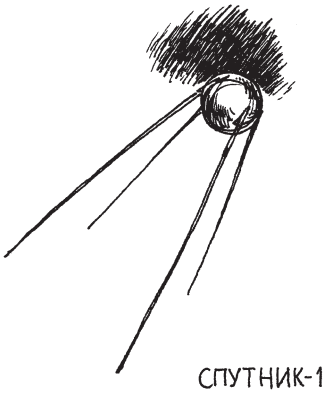
На первый взгляд, движения падающего яблока и Луны совсем не похожи. Яблоко падает к центру Земли, а Луна все время летит вокруг Земли в направлении, перпендикулярном направлению к центру нашей планеты. Но эти движения не похожи только на первый взгляд. Если бы Луна остановилась в своем движении вокруг Земли, она стала бы падать к центру Земли — точно так же, как яблоко. Разница только в том, что у Луны есть большая «горизонтальная» (точнее, перпендикулярная направлению на центр Земли) скорость, благодаря которой Луна, непрерывно падая на Землю, все время «промахивается» и летит мимо, «закругляя» свою траекторию, огибающую Землю. А у яблока такой круговой скорости нет.

Если бы Луна остановилась в своем движении вокруг Земли, она стала бы падать к центру Земли — точно так же, как яблоко.

А можем ли мы яблоко превратить в Луну? Точнее, заставить его тоже летать, не падая, вокруг Земли, подобно Луне? Ньютон понял, что можем.

Для этого надо бросить яблоко горизонтально (перпендикулярно направлению на центр Земли). Конечно, яблоко упадет, но уже не в том месте, где его бросили, — оно успеет пролететь по кривой некоторое расстояние, пока из-за притяжения Земли не упадет на ее поверхность.

Если же бросить яблоко с большей скоростью, оно пролетит дальше. Но не надо забывать, что Земли круглая. Если придать яблоку очень большую скорость, окажется, что кривизна земной поверхности будет равна



Первый в мире искусственный спутник Земли был запущен в СССР 4 октября 1957 года.

кривизне траектории падающего яблока. Это значит, что яблоко, все время падая на Землю под действием ее притяжения, будет стремиться к центру Земли, постоянно огибая Землю и постоянно падая «мимо». Яблоко превратится в спутник Земли — такой же, как и Луна!

Поразительно, что ни Луне, ни яблоку на орбите вокруг Земли не нужен источник движущей силы в виде духа, ангела или ракетного двигателя. На спутник Земли действует *только* сила притяжения Земли. А дальше все зависит от скорости. Если скорость маленькая — спутник упадет. Если скорость *достаточная* — он будет вечно летать вокруг Земли. Но очевидно, что изначально какая-то сила должна была разогнать Луну либо яблоко до этой скорости. Если бы не было Земли, яблоко летело бы прямолинейно с этой скоростью благодаря инерции. Но притяжение Земли все время отклоняет яблоко от движения по прямой, и оно летит по замкнутой траектории вокруг Земли.

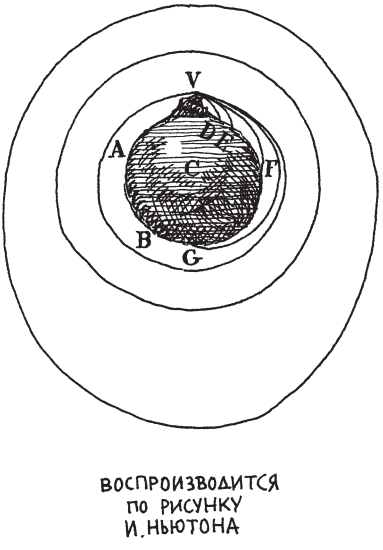
Конечно, Ньютон рассуждал не о яблоке. Его перу — напоминаю, что в те времена писали заостренными птичьими перьями, окуная их в чернила, — так вот, его перу принадлежал рисунок, который американский астроном **Чарлз Уитни** назвал «самым замечательным рисунком во всей истории науки».

Вместо человека, бросающего яблоко, Ньютон изобразил пушку, стреляющую горизонтально (пушечное ядро летит быстрее яблока под воздействием давления пороховых газов в стволе пушки). Он показал разные траектории ядра в зависимости от начальной скорости полета — по мере увеличения начальной скорости ядро падает дальше, еще дальше и, наконец, при некой

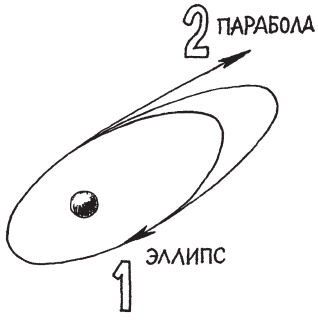
скорости становится спутником Земли, двигаясь по круговой орбите. Скорость, при которой тело (хоть яблоко, хоть ядро) движется по круговой орбите на сравнительно небольшой высоте над Землей, не падая, называется *круговой,* или *первой космической скоростью*.

Важно, что на рисунке Ньютона пушка установлена на очень высокой горе (на самом деле на Земле таких гор нет и быть не может). Это правильно: ведь ядро может потерять скорость из-за трения о воздух. Как только скорость спутника станет меньше первой космической, кривизна его траектории окажется больше кривизны земной поверхности, и спутник упадет (столкнется с Землей). Поэтому Ньютон начертил гору настолько высокую, что на ее вершине уже нет воздуха. Тогда трение равно нулю и спутник сможет свободно двигаться по окружности. Наверно, рисунок говорит еще и о том, что Ньютон понимал — воздуха в межпланетном пространстве нет.

А что, если скорость ядра окажется больше первой космической скорости? Согласно расчетам Ньютона, ядро будет двигаться по эллипсу, один из фокусов которого окажется в центре масс Земли. Законы Кеплера, описывающие движение тела по эллипсу, будут выполняться. Если продолжать наращивать скорость, эллипсы будут все более и более вытянутыми. Наконец настанет момент, когда длинный эллипс «разорвется» и превратится в разомкнутую траекторию — **параболу**. Спутник, двигаясь по такой траектории, навсегда покинет Землю и улетит прочь. Соответствующую скорость называют **вторая космическая**.



Подобный рисунок Ньютон, бывший к тому же неплохим рисовальщиком, выполнил собственноручно.



Разрыв эллиптической орбиты и вторая космическая скорость.

Что это за сила, которая притягивает яблоко, ядро или самого Ньютона к Земле?

Ньютон предположил, что эта сила зависит от массы тела. Чем больше масса, тем больше сила, с которой тело притягивает к себе другие тела. Анализ движения Луны вокруг Земли позволил вывести формулу для вычисления силы, с которой два любых тела притягиваются друг к другу. Эту формулу теперь знают все, ее изучают в школах на уроках физики. Она выражает закон всемирного тяготения, открытый Ньютоном.

Внимательно рассмотрим эту формулу:

$$F = \gamma \frac{mM}{r^2},$$

где m и M — массы двух тел, r — расстояние между ними, γ — коэффициент, который называется **гравитационная постоянная**, равная:

$$\gamma = 6{,}67 \times 10^{-11} \frac{\text{м}^3}{\text{кг} \times \text{с}^2}.$$

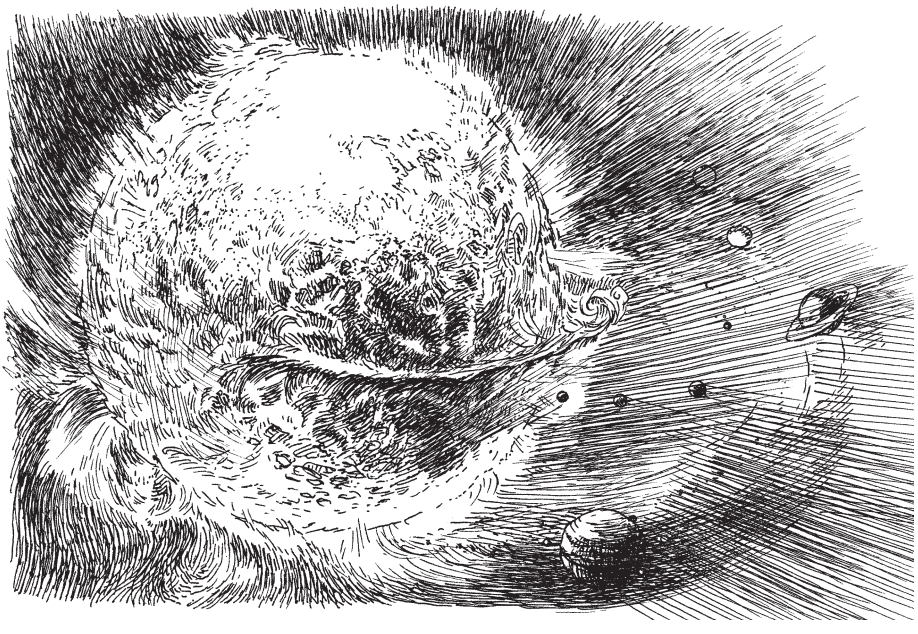
Гравитационная постоянная определяет величину силы притяжения между телами. 10^{-11} — это единица, деленная на огромное число — 10 с одиннадцатью нулями. Таким образом, гравитационная постоянная — это очень маленькое число. Значит, и сила тяготения, которую называют **гравитацией**, на самом деле очень мала. Более того, она уменьшается с расстоянием, причем очень быстро: в знаменателе расстояние r — в квадрате. Это значит, что при увеличении расстояния между телами, например, в два раза, сила притяжения между ними уменьшится в четыре раза.

Любопытно, что две массы M и m входят в формулу симметрично. Их можно поменять местами, и от этого ничего не изменится. Это значит, что,

например, Земля с массой *M* притягивается к Луне с массой *m* точно с такой же силой, с какой Луна притягивается к Земле.

Почему, например, мы явственно ощущаем, как нас притягивает к себе Земля, но не чувствуем, как притягиваются друг к другу два школьника, сидящих рядом за одним столом? Все дело в массе. Гравитационная постоянная настолько мала, что даже если мы перемножим массы двух школьников, после умножения на крошечную гравитационную постоянную результат будет ничтожно мал! Никаким динамометром мы не сможем измерить силу притяжения между школьниками — настолько она мизерна. Но когда в формуле учитывается огромная масса Земли (ее масса в килограммах выражается числом с 24 нулями) — сила будет заметна. Каждый из нас (и Ньютон в том числе) мог ощутить, как сильно Земля притягивает нас к себе. Подпрыгнув, мы не улетаем в космос, а с ускорением падаем обратно.

Согласно теории Ньютона гравитацию испытывают все *тела*, обладающие массой (а иных тел не бывает). Все тела притягиваются друг к другу, и силу притяжения можно рассчитать, применив разработанный Ньютоном математический аппарат, в основе которого лежит закон тяготения.



Солнечная система. Рисунок показывает сравнительную величину Солнца и планет. Расстояния от планет до Солнца, а также между планетами переданы условно.

Три закона Кеплера являются следствиями закона всемирного тяготения. Студенты — будущие астрономы — выводят эти формулы аналитически. Если мы знаем массы и скорости тел в некий момент времени, формулы позволяют вычислять и положения, и скорости тел для каждого момента времени.

Теория Ньютона прекрасно работает. С ее помощью с высокой точностью рассчитываются положения небесных тел и космических аппаратов, траектории межпланетных зондов, скорость которых меняется с помощью кратковременного включения ракетного двигателя, направленного в нужную сторону. В итоге мы (человечество) научились выполнять виртуозные маневры, перелетать от одной планеты к другой и даже использовать притяжение планет для маневрирования в космосе. Все

это может говорить о том, что теория тяготения *правильно описывает мир*[15].

Забегая вперед, скажем следующее. Наблюдения в крупнейшие телескопы позволяют сделать вывод, что устройство систем из небесных тел на гигантских расстояниях от нас — такое же, как вблизи Солнца. Это значит, что закон тяготения справедливо называется законом всемирного тяготения. Он действует одинаково во всей наблюдаемой нами части Вселенной. Этот удивительный закон природы носит поистине универсальный характер.

Итак, давайте разберемся еще раз. Согласно теории, разработанной Ньютоном, Вселенная представляет собой гигантский (возможно, бесконечный) объем. Он заполнен звездами. То, что раньше воспринималось как весь мир, теперь превратилось в крошечный фрагмент мира — Солнечную систему, которая включает в себя Солнце и несколько планет, обращающихся вокруг него по эллиптическим орбитам. Расстояния между соседними звездными системами в рамках такой картины мира должны быть огромными. Когда-то Джордано Бруно говорил, что это хорошо: если бы планетные системы были близки друг к другу, их жители могли бы взаимодействовать, но кончилось бы это плохо: сильные победили бы слабых.

Управляет всеми движениями небесных тел одна сила — всемирное тяготение. Все тела притягиваются друг к другу. Все тела, которые обладали низкими

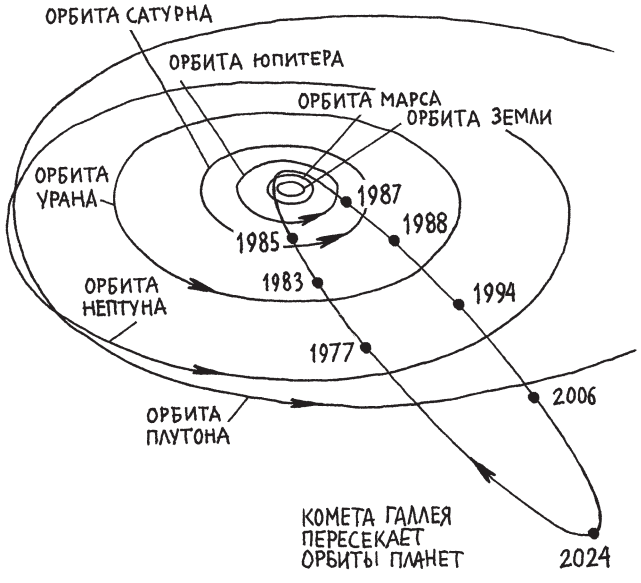
[15] Внимательный читатель может сказать: «Ха! Система Птолемея тоже давала правильные предсказания и успешно описывала наблюдаемые явления, но затем оказалось, что она совершенно неправильна. Не может ли такое произойти с теорией тяготения Ньютона?» Ответ может быть таким: закон тяготения Ньютона в принципе верен (по сегодняшним представлениям). Однако оказалось, что он, как и законы Кеплера, является следствием более глубоких природных закономерностей. Об этом будет сказано в следующих главах.

Заметный даже невооруженным глазом газопылевой хвост выделяет комету на небосводе.

скоростями, притянулись к своим массивным соседям и упали на них, в результате массивное тело стало еще больше. Все тела, которые обладают очень высокими скоростями, могут свободно двигаться в пустом пространстве между звездными системами. Те же тела, которые обладали скоростью в пределах от первой до второй космической по отношению к близкому массивному телу, являются спутниками этого тела. Так, планеты Солнечной системы являются спутниками Солнца, Луна является спутником Земли, открытые Галилеем с помощью телескопа объекты возле Юпитера являются его спутниками…

А как же твердые небесные сферы?

Окончательному их разрушению способствовали **кометы**. Иногда на звездном небе неожиданно появляются странные объекты, напоминающие звезды с хвостами, которые передвигаются на фоне звезд. Их называют кометами (косматыми), и долгое время люди боялись комет, считая, что это предвестники будущих несчастий. Сегодня мы знаем, что кометы — это сравнительно небольшие (по сравнению с планетами) небесные



Комета Галлея. Отмечены положения кометы, очередное максимальное удаление приходится на 2024 год.

тела, состоящие из водяного льда, замерзших газов и вмороженной пыли. Когда ледяное ядро кометы проходит вблизи Солнца, оно нагревается, начинает «газить и пылить», в результате возникает длинный «хвост», состоящий из частиц газа и пылинок. Особенностью комет является то, что они движутся иногда по очень вытянутым эллипсам.

Закон тяготения и его следствия — законы Кеплера — позволяли, анализируя наблюдения движения комет, рассчитать их траектории, описать орбиты, вычислить скорости. Этим занимался, в частности, друг Ньютона астроном **Эдмунд Галлей** (1656–1742). Его расчеты показали, что вытянутый эллипс одной из комет (она получила имя Галлея) пересекает орбиты всех планет и уходит далеко за орбиту Сатурна! Если бы существовали хрустальные небесные сферы, кометы не могли бы так двигаться — они сталкивались бы со сферами. Ниче-