

Математические начала натуральной философии



Isaac Newton · 1687

Иллюстрированные аудиолекции

Lecturized

Математические начала натуральной философии

Иллюстрированные аудиолекции

Isaac Newton · 1687

Пересказано в иллюстрированных лекциях Lecturized
lecturized.com

По оригиналу: The Mathematical Principles of Natural Philosophy, translated by
Andrew Motte (first American edition, 1846)

Содержание

Что понадобилось Ньютону до законов

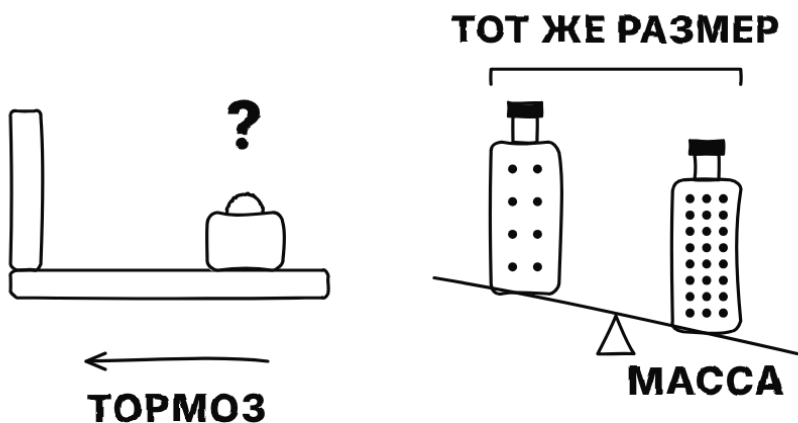
Как измерять тяги и что стоит за часами

Как узнать, что нечто действительно движется

Ради чего Ньютон написал книгу

Что понадобилось Ньютону до законов

Резко затормозите в машине, и незакреплённая сумка на сиденье съедет вперёд, хотя её никто не толкал. Почему она так делает и что, собственно, съехало? Великая книга Ньютона начинается с ответов на такие простые вопросы, потому что без ясных ответов его законы движения нельзя было бы даже сформулировать. Поэтому прежде всяких законов он пишет определения: что такое материя, что такое движение, что такое сила.



Сумка и бутылки

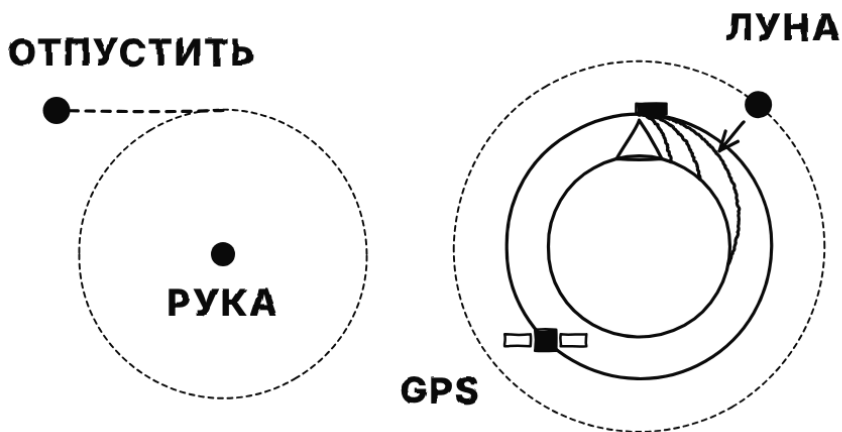
Первая мысль — количество материи, которое он называет массой. Это не размер вещи, а то, сколько в ней вещества: насколько плотно оно упаковано вместе с тем, сколько места занимает. Жёсткая бутылка, туго накачанная воздухом, и бутылка с воздухом обычного давления одного размера, но вмещают очень разное количество. Ньютон также нашёл тщательными опытами с маятниками, что масса всегда идёт рука об руку с весом. Вот почему весы в вашей ванной могут честно показывать вашу массу в килограммах.

Вторая мысль — количество движения, то, что мы теперь называем импульсом: материя и скорость, взятые вместе. Вдвое больше материи при той же скорости — вдвое больше движения, а большая скорость добавляет ещё. Грузёному фургону нужно гораздо больше дороги, чтобы остановиться, чем маленькому автомобилю при той же скорости, потому что он несёт гораздо больше движения.

Третья мысль — та, что объясняет съезжающую сумку: материя упряма. Всякое тело продолжает делать то, что уже делает, — стоит на месте или движется прямо вперёд в ровном темпе, — если на него ничто не действует. Ньютон называет это силой бездействия, и наше слово «инерция» происходит от его латинского названия. Сила же — это лишь действие, меняющее то, что делает тело, и длится она лишь пока действует. Сумка съехала, потому что машину заставили остановиться, а сумку — нет: это инерция, пойманная в один и тот же миг тормозами и акселерометром в вашем телефоне.

Четвёртая мысль — сила, о которой вся книга: тяга к центру, которую он называет центростремительной. Тяжесть, магнетизм

и то, что держит планеты на их кривых путях, — всё это силы такого рода. Камень в праще рвётся улететь, а праща его удерживает; ядро, выпущенное с горы достаточно быстро, вечно падало бы вокруг Земли, а не на неё; а Луну держит на её пути тяга ровно нужной силы. Каждый спутник GPS над нами — это то самое ядро, падающее вокруг Земли и никогда её не достигающее.



Тяга к центру

Из этих немногих мыслей вытекает вся остальная книга. Её задача, говорит Ньютон, — находить тягу по пути, которым идёт тело, и путь по тяге, которую оно испытывает. Он также начинает измерять тяги двумя способами — силой их источника и тем, как быстро они разгоняют вещи, — и отмечает, что на одном

расстоянии от Земли тяжесть разгоняет всё одинаково, тяжёлое и лёгкое. В этой части опущены его расчёты, вроде ядра, улетевшего на две мили, а потом вдесятеро дальше, и тонкости его мер силы; их разбирают более подробные варианты этой главы.

Запомним

Ньютон начинает с определений, потому что законам движения нужны ясные слова для материи, движения и силы. Масса — это сколько вещества в теле, и она совпадает с весом; импульс — это материя и скорость вместе. Инерция — это упрямство материи, а сила — лишь действие, которое его меняет. Тяга к центру превращает прямое движение в орбиту — так держатся в небе Луна и каждый спутник, — а находить пути по тягам и тяги по путям — работа всей книги.

Вопросы

1. Почему незакреплённая сумка съезжает вперёд, когда машина резко тормозит?
 - a. Что-то в машине толкает её вперёд
 - b. Она продолжает двигаться, пока машину заставляют остановиться
 - c. Тяжесть тянет её вперёд
 - d. Тормоза придают ей дополнительную скорость

2. Что измеряет ньютоново количество материи, масса?
- a. Насколько велика вещь
 - b. Как быстро она движется
 - c. Сколько в ней вещества: упаковка и место вместе
 - d. Насколько сильно она давит на землю на любой высоте
3. Что тяга к центру делает с движущимся телом?
- a. Превращает прямое движение в орбиту
 - b. Сразу останавливает тело в центре
 - c. Заставляет тело двигаться по прямой
 - d. Меняет массу тела

Ответы

1. **b)** Сумка съехала, потому что машину заставили остановиться, а сумку — нет: материя упряма и продолжает делать то, что уже делает.
2. **c)** Масса — это не размер вещи, а то, сколько в ней вещества: насколько плотно оно упаковано вместе с тем, сколько места занимает.
3. **a)** Тяга к центру превращает прямое движение в орбиту — так держатся в небе Луна и каждый спутник.

Задачи

1. Объясните своими словами, почему Ньютон написал определения прежде всяких законов движения.

Подсказка: Подумайте, о чём должен говорить закон движения.

Ответ: Закон движения говорит о материи, движении и силе, поэтому этим словам сначала нужны ясные значения. Ньютон закрепляет их в определениях: масса — сколько вещества в теле,

импульс — материя и скорость вместе, инерция — упрямство материи, а сила — действие, меняющее то, что делает тело.

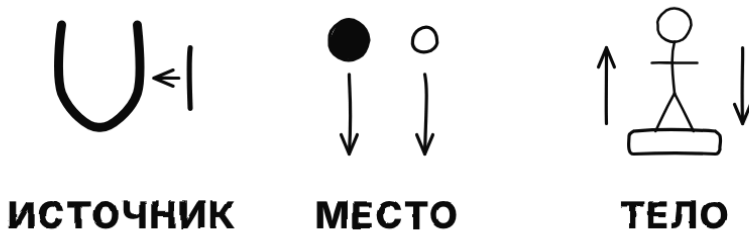
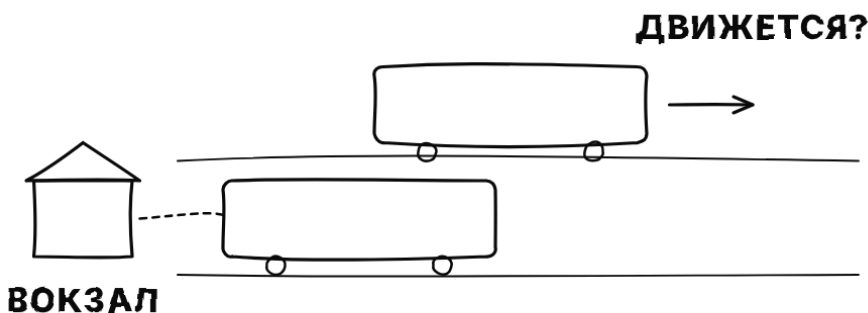
2. Почему гружённому фургону нужно больше дороги, чтобы остановиться, чем маленькому автомобилю при той же скорости?

Подсказка: Воспользуйтесь количеством движения: из чего оно складывается?

Ответ: Количество движения учитывает материю и скорость вместе. При той же скорости у гружёного фургона гораздо больше материи, значит, он несёт гораздо больше движения, а большее движение дольше отнимать.

Как измерять тяги и что стоит за часами

Сядьте в поезд, ждущий у платформы, и смотрите, как трогается поезд на соседнем пути. На миг вы уверены, что движетесь вы, пока не взглянете на здание вокзала и не увидите, что вы не сдвинулись с места. Наше ощущение движения целиком зависит от того, с чем мы себя сравниваем. Этот отрезок книги Ньютона задаёт два вопроса: как именно измерять тягу и что вообще значит, что нечто движется.

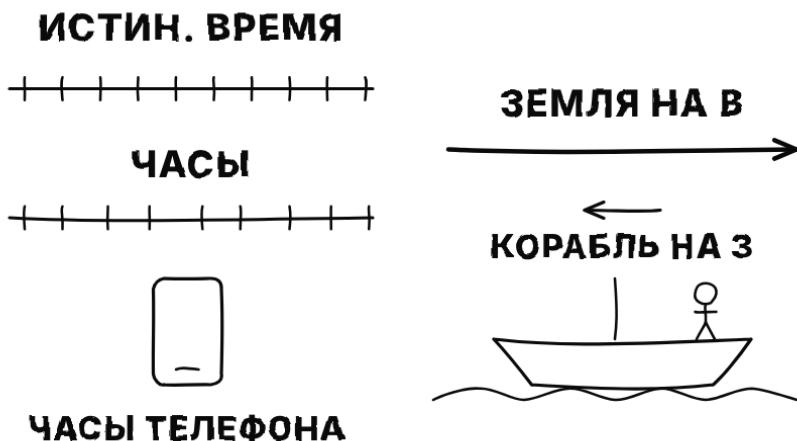


Кто движется? Насколько сильна тяга?

По первому вопросу Ньютон разделяет три способа измерить одну и ту же тягу. Один смотрит на источник — как большой магнит сильнее маленького. Другой смотрит на место — на то, как быстро там тяга разгоняет вещи, а это одинаково для всякого тела на одной высоте над Землёй. А третий смотрит на всё тело — на то, сколько движения сообщает ему тяга, а это просто вес тела. Вес — это разгон, приложенный ко всей материи тела, так что вблизи Земли, где разгон для всех одинаков, вес просто следует за количеством материи. Вот почему работают весы в ванной: они толкают вверх ровно так же сильно, как Земля тянет вас, а Земля тянет каждый ваш килограмм одинаково.

Ньютон настаивает, что это лишь математические меры. Он не берётся знать, что такое тяжесть на самом деле и как она действует на расстоянии, и предупреждает читателей не вчитывать такие утверждения в его слова.

По второму вопросу он отказывается определять время, пространство, место и движение, которые, как всем кажется, они знают, но предупреждает, что люди знают их только через вещи, которые видят, и это сбивает их с пути. Поэтому он делит каждое на истинное и измеряемое. Истинное время течёт равномерно само по себе; часы и дни — лишь движения, которыми мы его измеряем, и они могут быть слегка неравномерными. Истинное пространство никогда не движется; пространства, которые мы измеряем, — комната, воздух, небо над городом — заданы телами и могут двигаться вместе с ними. Часы вашего телефона считают колебания крошечного кристалла: они измеряют время, но не являются самим временем.



Истинное и измеряемое

То же деление относится и к движению, и тут появляется поезд. Истинное движение — это переход из одного места истинного пространства в другое; относительное движение — переход, измеренный по окружающим нас вещам. Пример Ньютона — корабль: пассажир, неподвижно сидящий в каюте, покоится относительно корабля, но движется вместе с ним, а если движется и Земля, истинное движение пассажира складывает движение Земли, корабля и его собственное. Матрос, который в сравнении с берегом будто медленно дрейфует на запад, на самом деле может мчаться сквозь пространство на восток, уносимый вращающейся Землёй. Скорость, которую показывает ваш телефон, пока вы идёте вдоль движущегося поезда, измерена

лишь относительно земли; огромного собственного движения Земли в этом числе нет никогда.

Из всего этого вытекает программа книги: точно измерять силы и находить истинные движения за относительными, которые мы наблюдаем. В этой части опущены расчёты Ньютона, вроде веса тел там, где тяжесть вдвое меньше, и точных скоростей в примере с кораблём, а также его замечания о месте как сумме мест частей тела; их разбирают более подробные варианты этой главы.

Запомним

Тягу можно измерить силой её источника, тем, как быстро она разгоняет вещи в данном месте, или весом, который она даёт всему телу. Вес — это местный разгон, приложенный ко всей материи тела, так что вблизи Земли он просто следует за количеством материи. Ньютон отделяет истинное время и истинное пространство, которые не меняются и не движутся, от часов и пространств, которыми мы их измеряем. Тело, покоящееся на движущемся корабле или на движущейся Земле, на самом деле движется, и найти истинное движение за видимым относительным — задача, которая впереди.

Вопросы

1. Почему вам иногда кажется, что движется ваш поезд, когда на самом деле уходит соседний?

- a. Потому что наше ощущение движения зависит от того, с чем мы себя сравниваем
 - b. Потому что стоящие поезда вибрируют
 - c. Потому что движется вокзал
 - d. Потому что истинное время замедляется
2. Какая из трёх мер тяги Ньютона — это вес тела?
- a. Сила источника
 - b. Как быстро тяга разгоняет вещи в данном месте
 - c. Сколько движения тяга сообщает всему телу
 - d. Расстояние от центра
3. Пассажир покоится в каюте движущегося корабля на движущейся Земле. Какой вывод делает Ньютон?
- a. Пассажир истинно покоится
 - b. Пассажир на самом деле движется, разделяя движения корабля и Земли
 - c. Пассажир движется лишь относительно каюты
 - d. О движении пассажира ничего нельзя сказать

Ответы

1. **a)** Наше ощущение движения целиком зависит от того, с чем мы себя сравниваем, а в поле зрения был только другой поезд.
2. **c)** Одна мера смотрит на всё тело — на то, сколько движения сообщает ему тяга, а это просто вес тела.
3. **b)** Тело, покоящееся на движущемся корабле или на движущейся Земле, на самом деле движется, и его истинное движение складывает движение Земли, корабля и его собственное.

Задачи

1. Своими словами: чем истинное время отличается от времени, которое показывает ваш телефон?

Подсказка: Спросите себя, что на самом деле считает телефон.

Ответ: Истинное время течёт равномерно само по себе, что бы ни происходило. Телефон считает колебания крошечного кристалла, то есть движение, и использует его, чтобы измерять это течение; он измеряет время, но не является им, и любая такая мера может быть слегка неравномерной.

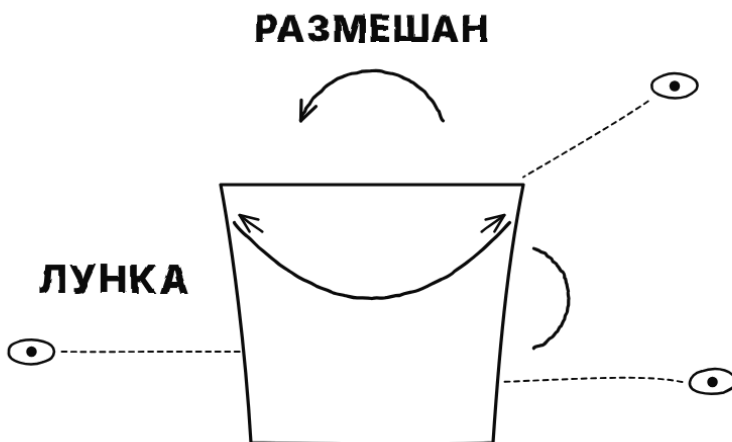
2. Почему Ньютон говорит, что эти тяги — лишь математические меры?

Подсказка: Подумайте, что он утверждает и чего не утверждает о тяжести.

Ответ: Он измеряет тяги по их источнику, по разгону в данном месте и по весу, который они дают телу, но не берётся знать, что такое тяжесть на самом деле и как она действует на расстоянии, поэтому предлагает лишь меры, а не физические причины.

Как узнать, что нечто действительно движется

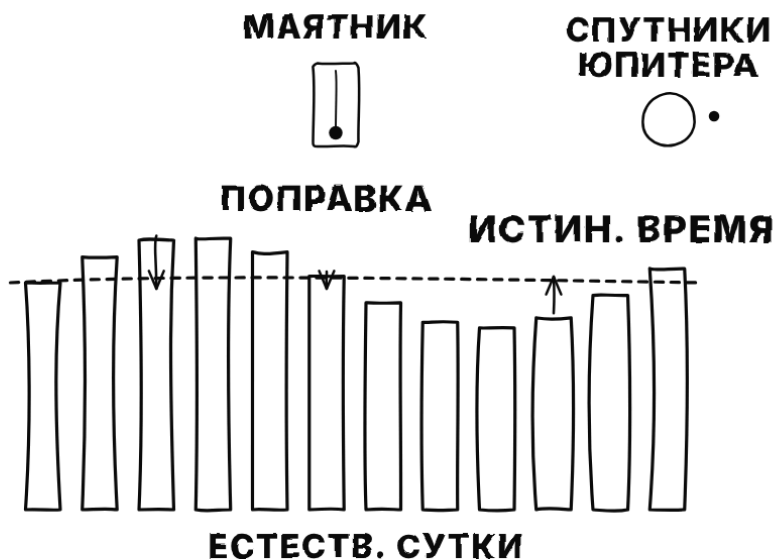
Энергично размешайте чашку чая и выньте ложку. Поверхность прогибается в середине и поднимается у края. Она выглядит одинаково, смотрите ли вы со своего стула, из другого конца комнаты или из окна проезжающего поезда. Эта вогнутая поверхность — не вопрос точки зрения; это действительное действие действительного вращения. Этот отрезок книги Ньютона задаёт вопрос, который звучит почти неразрешимым: раз мы всегда видим, как вещи движутся лишь относительно других вещей, как нам узнать, что движется по-настоящему? Вогнутая поверхность вращающейся жидкости оказывается его ответом.



Размешанный чай

Ньютон начинает со времени, потому что у времени та же беда. Мы измеряем время сутками, тем, как солнце идёт от полудня до полудня, и все считают эти сутки равными. Но они не вполне равны, и астрономам приходится их исправлять, прежде чем точно вычислять движения планет. Ньютон идёт дальше: быть может, нигде нет совершенно равномерного движения, так что никакие часы не могут измерить время точно. Всякое движение может ускоряться или замедляться, но само истинное время течёт неизменно, и вещи делятся одинаково долго, быстры ли движения вокруг них, медленны или их нет вовсе. Так что длительность надо отличать от часов, которые её измеряют, и астрономы восстанавливают её из неравных суток своей поправкой, необходимость которой показывают маятниковые

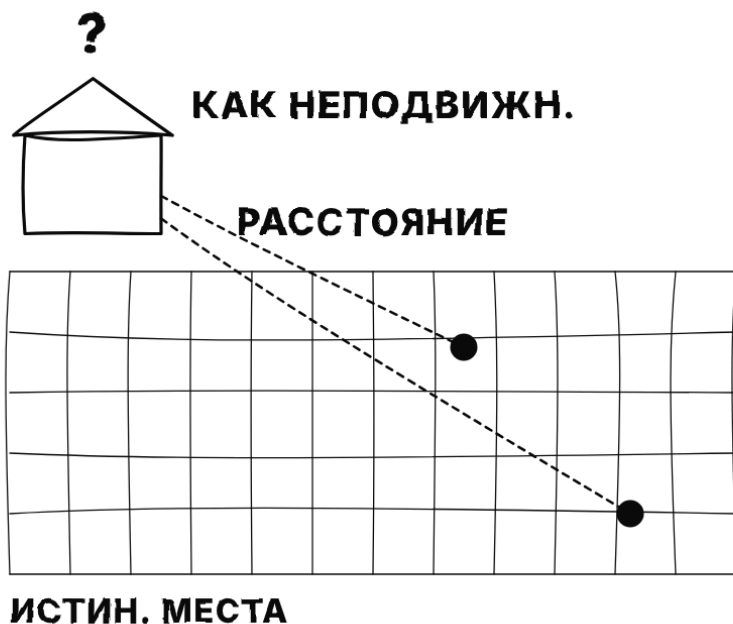
часы и сроки спутников Юпитера. Солнечные часы в саду в течение года отклоняются примерно на четверть часа в ту или другую сторону от ровных часов вашего телефона: это отклонение и есть то самое неравенство, о котором говорит Ньютон.



Естественные сутки неравны

Затем пространство. Части пространства, как и части времени, вечно сохраняют свой порядок; они — истинные места всего, и переход из одной в другую — это истинное движение. Беда в том, что части пространства мы не видим и различить не можем. Поэтому на практике мы выбираем какое-нибудь тело, которое считаем стоящим на месте, — землю, берег, вокзал — и отмеряем от него каждое место и каждое движение. Для обычной жизни

это совершенно годится. Но Ньютон предупреждает, что, постигая природу, нужно смотреть сквозь наши чувства, потому что нигде может не оказаться тела, истинно покоящегося, от которого можно было бы мерить. Карта в вашем телефоне отмеряет всё от земли под ногами, будто она неподвижна, — это совершенно правильно, чтобы найти дорогу, и ничего не говорит о том, как движется сама Земля.

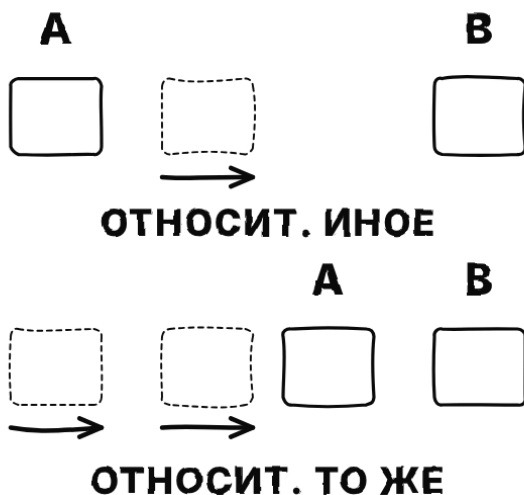


Места, отмеряемые от тела

Как же тогда вообще распознать истинный покой или истинное движение? Ньютон обещает три рода подсказок: свойства, причины и действия. Свойства оказываются разочаровывающими. Истинно покоящиеся вещи остаются на месте друг относительно друга, но истинно покоящееся тело

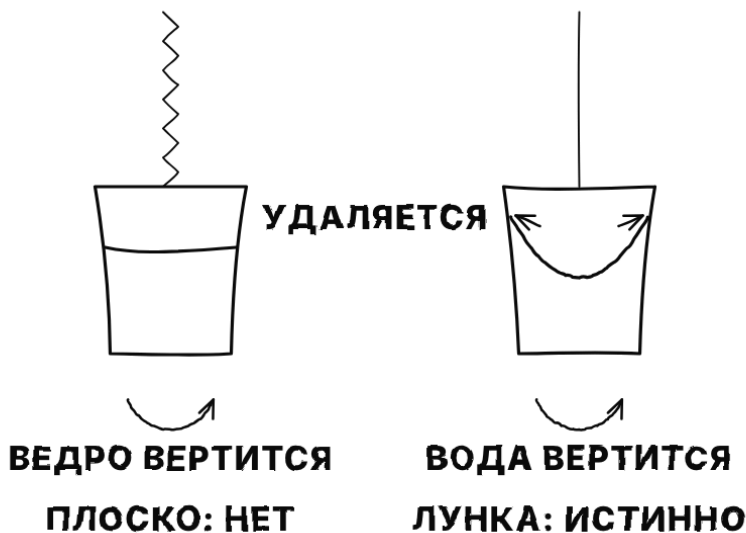
может находиться где-то далеко среди звёзд, и ничто в том, как близкие вещи расположены друг относительно друга, не скажет, остаются ли они неподвижными по отношению к нему. А части всегда разделяют движение целого, которому принадлежат: если движется скорлупа, её ядро движется вместе с ней, ни на миг не покидая скорлупу. Так что спокойный покой среди других вещей ничего не доказывает об истинном покое. Телефон, неподвижно лежащий в вашем кармане в едущем автобусе, никогда не сдвигается в кармане, но его везут через весь город.

Причины полезнее. Истинное движение меняется лишь тогда, когда сила действует на само тело. С относительным движением иначе: оно может измениться вовсе без силы на тело — просто потому, что вещи, с которыми его сравнивают, оттолкнули, — и может остаться точно прежним, когда тело толкают, если вещи вокруг толкают вместе с ним. Когда автобус резко тормозит, вы и телефон в вашем кармане замедляетесь вместе, так что телефон вообще не движется относительно вас, хотя его истинное движение явно изменилось. Значит, истинное движение не может быть тем же, что соотношение с другими телами.



Толкните другое тело

Решающая подсказка — действия, и здесь Ньютон описывает опыт, который проделал сам. Он подвесил ведро с водой на длинной верёвке, много раз закрутил верёвку, удержал ведро неподвижным, а потом отпустил. Пока верёвка раскручивалась, ведро вертелось всё быстрее, но сначала вода внутри оставалась совершенно плоской, хотя ведро вращалось вокруг неё. Затем мало-помалу вода переняла движение, начала вращаться, опустилась в середине и полезла вверх по стенкам, всё выше и выше, пока вода и ведро не завертелись вместе.



Ведро Ньютона

Посмотрите, что это значит. В начале вода двигалась быстрее всего относительно ведра, но не выказывала никаких признаков вращения. В конце вода вовсе не двигалась относительно ведра, но поднималась по стенкам выше всего. Подъём — стремление наружу, прочь от оси — следует за истинным вращением воды и никак не связан с её движением относительно окружающего ведра. Вот движение, которое выдаёт себя действительным действием, с чем бы мы его ни сравнивали.

Опыт

Наполните стеклянную банку водой наполовину и бросьте в неё несколько зёрен риса. Равномерно вращайте банку на поворотном столике или вращающейся подставке, если она у вас есть, и смотрите сбоку. Сначала вода остаётся плоской, пока банка вращается; через некоторое время она вращается вместе с банкой, и её поверхность становится вогнутой чашей. Вы повторили ведро Ньютона: лунка появляется вместе с собственным вращением воды, а не с её движением мимо стекла.

Из этого вытекает целый способ мыслить о движении. У каждого вращающегося тела лишь одно истинное вращение с одним соответствующим ему действительным стремлением наружу. Но у него бесчисленное множество относительных движений — по одному на каждое другое тело, с которым его можно сравнить, — и у этих относительных движений нет никаких собственных действительных действий. Ньютон даже решает этим судьбу старой картины небес, в которой планеты покоятся внутри вращающихся хрустальных сфер, уносящих их по кругу: такие планеты истинно двигались бы, потому что меняют положение друг относительно друга, чего истинно покоящиеся вещи никогда не делают, и как части вращающегося целого стремились бы наружу от его оси, как вода в ведре. Режим отжима в стиральной машине каждую неделю показывает то же стремление наружу, прижимая бельё к барабану, пока тот истинно вращается.

В этой части опущены более тонкие шаги рассуждения Ньютона — например, как истинное движение складывается из движения

тела на его месте, движения этого места на его собственном месте и так далее вплоть до неподвижного пространства, — и его замечания о том, почему части времени и пространства никогда не могут поменять порядок; их разбирают более подробные варианты этой главы.

Запомним

Сутки и часы лишь измеряют время, которое само течёт неизменно, и астрономы исправляют неравные сутки, чтобы его найти. Каждое место мы отмеряем от какого-нибудь тела, которое считаем неподвижным, но близкие положения никогда не выдадут истинного покоя, потому что части разделяют движение окружающего их целого. Истинное движение меняется лишь тогда, когда сила действует на само тело, а относительное может измениться или остаться прежним независимо от этого. Истинное вращение выдаёт себя действительным действием — стремлением наружу, — вот почему вода в ведре Ньютона поднимается по стенкам лишь тогда, когда истинно вращается. У каждого вращающегося тела одно истинное движение с действительными действиями среди бесчисленных относительных, у которых их нет.

Вопросы

1. Почему вогнутая поверхность размешанного чая показывает действительное вращение, а не точку зрения?

- a. Она выглядит одинаково, откуда бы вы ни смотрели
 - b. Она исчезает, если пересесть на другой стул
 - c. Она появляется только в движущемся поезде
 - d. Она зависит от цвета чашки
2. Почему спокойный покой среди других вещей ничего не доказывает об истинном покое?
- a. Потому что ничто не может покоиться
 - b. Потому что части разделяют движение целого, которому принадлежат
 - c. Потому что покою нужна сила
 - d. Потому что часы неравномерны
3. Когда в ведре Ньютона вода поднялась по стенкам выше всего?
- a. В начале, когда она быстрее всего двигалась относительно ведра
 - b. В конце, когда она вовсе не двигалась относительно ведра
 - c. Когда ведро удерживали неподвижным
 - d. Она вовсе не поднималась

Ответы

1. a) Лунка выглядит одинаково с вашего стула, из другого конца комнаты или из проезжающего поезда; это действительное действие действительного вращения, а не вопрос точки зрения.
2. b) Части всегда разделяют движение целого, которому принадлежат, как ядро движется со своей скорлупой, так что покой среди других вещей ничего не доказывает об истинном покое.

3. б) В конце вода вовсе не двигалась относительно ведра, но поднялась выше всего: подъём следует за её истинным вращением.

Задачи

1. Своими словами: почему истинное движение не состоит в соотношениях с другими телами?

Подсказка: Сравните, что сила, приложенная к телу, делает с его истинным и с его относительным движением.

Ответ: Истинное движение меняется лишь тогда, когда сила действует на само тело, а относительное может измениться без всякой силы на него — просто потому, что движутся окружающие тела, — и может остаться прежним, когда его толкают вместе с ними. Раз они могут меняться независимо, истинное движение не может быть соотношением.

2. Опишите, что вы увидели бы во вращающейся стеклянной банке с водой и что это показывает.

Подсказка: Подумайте о начале и о конце вращения.

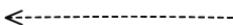
Ответ: Сначала вода остаётся плоской, пока банка вращается вокруг неё; позже она вращается вместе с банкой, и её поверхность становится вогнутой чашей. Лунка появляется вместе с собственным вращением воды, а не с её движением мимо стекла, — точно как в ведре Ньютона.

Ради чего Ньютон написал книгу

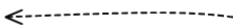
Представьте два тяжёлых шара, связанных верёвкой и вращающихся вокруг своей середины в совершенно пустом небе. Ньютон завершает свои определения утверждением, что мы всё равно могли бы сказать, что они вращаются.

ВЕЛИЧИНЫ $\neq$ МЕРЫ

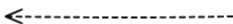
ВРЕМЯ



ПРОСТР.



МЕСТО



ДВИЖЕНИЕ

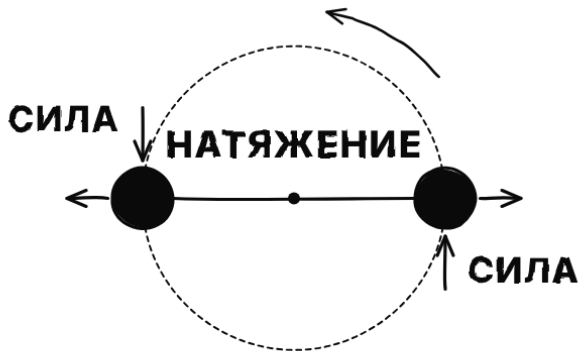


Величины и их меры

Сначала он решает вопрос о словах. Наши часы, наши измеренные места, наши скорости относительно земли — лишь меры времени, пространства и движения, а не сами эти вещи. В повседневной речи эти слова означают меры, и это нормально,

пока никто не принимает меру за действительную величину, стоящую за ней.

Затем он берётся за трудное: истинное движение нельзя увидеть прямо, потому что неподвижное пространство невидимо. Но оно оставляет подсказки в наблюдаемых движениях и прежде всего в силах. Верёвку между двумя шарами туго натягивает их стремление наружу, так что её натяжение выдаёт, как быстро они вращаются, а толчок по одинаковым сторонам обоих шаров выдаёт, в какую сторону, — даже когда больше ничего не видно. Гироскоп вашего телефона работает в этом духе, чувствуя собственное вращение по силам внутри микросхемы.



ПУСТОТА

Два шара на верёвке

Из этого вытекает вся программа книги: выводить истинные движения из их причин и действий, а причины — из движений, которые мы видим. В этой части опущены подробности того, как можно показать, что добавленные далёкие тела, вроде неподвижных звёзд, покоятся, а движутся шары; их объясняют более подробные варианты этой главы. Когда материя, движение и сила определены, а истинное движение отделено от видимости, могут начаться законы движения Ньютона.

Запомним

Повседневные времена, места и скорости — это меры, а не сами истинные величины. Истинное движение нельзя увидеть, но силы его выдают, как натяжение верёвки выдаёт два вращающихся шара. Находить истинные движения по причинам и действиям, а причины — по движениям, — вот для чего вся книга.

Вопросы

1. Почему истинное движение нельзя увидеть прямо?
 - а. Потому что оно слишком быстрое
 - б. Потому что неподвижное пространство невидимо
 - с. Потому что часы неравномерны
 - д. Потому что истинное движение есть только у планет

2. Что выдаёт натяжение верёвки между двумя вращающимися шарами?
- a. Насколько тяжела верёвка
 - b. Как быстро вращаются шары
 - c. Как далеко звёзды
 - d. Время суток
3. Для чего, по словам Ньютона, вся книга?
- a. Чтобы перечислить звёзды
 - b. Чтобы выводить истинные движения из причин и действий, а причины — из наблюдаемых движений
 - c. Чтобы определить слова для Писания
 - d. Чтобы построить лучшие часы

Ответы

1. **b)** Истинное движение никогда нельзя увидеть прямо, потому что неподвижное пространство невидимо; оно оставляет подсказки в наблюдаемых движениях и в силах.
2. **b)** Верёвку туго натягивает стремление шаров наружу, так что её натяжение выдаёт, как быстро они вращаются.
3. **b)** Программа книги — выводить истинные движения из их причин и действий, а причины — из движений, которые мы видим.

Задачи

1. Своими словами: чем мера, вроде часа, отличается от истинной величины, которую она измеряет?

Подсказка: Спросите себя, из чего сделан час.

Ответ: Час — это мера, сделанная каким-то движением, вроде тиканья часов или вращения Земли, которой пользуются вместо самого времени. Истинное время течёт само по себе; час лишь измеряет его, и их нельзя принимать одно за другое.

2. Как можно было бы показать, что два шара в пустом небе вращаются, если их не с чем сравнить?

Подсказка: Подумайте о верёвке между ними.

Ответ: Их стремление наружу туго натягивает верёвку, так что натяжение верёвки показывает, что они вращаются и как быстро; толчок по одинаковым сторонам, натягивающий верёвку сильнее, показывает, в какую сторону.