

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

Сколько материи, сколько движения

Три способа измерить одну тягу

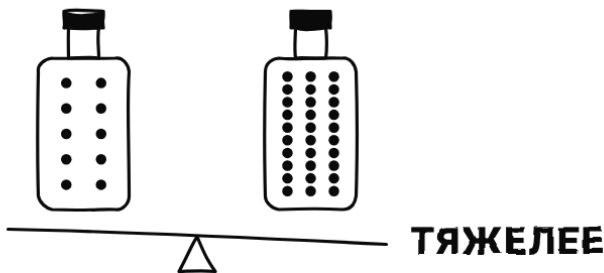
Истинное время, истинное пространство и матрос

Почему истинное движение не прочесть по соседям

Ведро, два шара и цель книги

Сколько материи, сколько движения

Возьмите две одинаковые жёсткие пластиковые бутылки, одну — с воздухом обычного давления и с закрученной крышкой. Теперь накачайте в другую воздух велосипедным насосом, пока она не станет твёрдой. Обе бутылки занимают одинаковое место, но твёрдая содержит больше воздуха и на чувствительных кухонных весах даже весит чуть больше. Значит, «сколько» чего-то есть, по одному размеру не скажешь. Именно этот вопрос Ньютон решает первым, ещё до того, как записан хоть один закон движения.



$$\text{МАССА } m = \rho \times V \text{ ОБЪЁМ}$$

ПЛОТНОСТЬ

$$2 \times 2 = 4$$

$$2 \times 3 = 6$$

Тот же объём, больше материи

Его первое определение говорит, что количество материи измеряется плотностью и объёмом, взятыми вместе. В сегодняшней записи это пишут как $m = \rho V$: масса m есть плотность ρ , греческая буква «ро», умноженная на объём V . Словами: у тела больше материи, когда она упакована теснее, и больше, когда тело крупнее, и два эти действия перемножаются. Наглядно это толпа: вдвое больше людей на квадратный метр на вдвое большей площади дают вчетверо больше людей. Собственные числа Ньютона работают так же: воздух двойной плотности в двойном объёме вчетверо больше по количеству, потому что $2 \times 2 = 4$; в тройном объёме — вшестеро, потому что $2 \times 3 = 6$. Снег, спрессованный в лёд, и порошок, сжатый в лепёшку, меняют свой объём и свою плотность, но не количество материи.

Ньютон пока оставляет в стороне всякую тонкую среду, которая могла бы свободно течь между частями тел; он считает только материю самого тела. Именно это количество он отныне будет называть телом или массой. И он добавляет нечто совсем не очевидное: масса тела пропорциональна его весу. Он установил это опытами с маятниками, проделанными очень тщательно и описанными в книге дальше. Маятники одной длины с грузами из совершенно разных веществ качаются за одно и то же время, и это говорит ему, что вес растёт точно в ногу с массой. Вот почему весы в вашей ванной, которые на самом деле измеряют тягу, могут показывать килограммы материи.

Второе определение строится на первом. Количество движения измеряется скоростью и количеством материи вместе, и сегодня мы пишем $p = mv$, где p называют импульсом. Словами: чем больше материи движется и чем быстрее она движется, тем

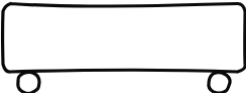
больше движения. Наглядно: движение целого тела — это просто сложенные вместе движения всех его частей, так что вдвое больше материи при той же скорости — это вдвое больше движения. Снова числа Ньютона: у тела вдвое большего количества при равной скорости движение вдвое больше; если и скорость вдвое больше, движение вчетверо больше, $2 \times 2 = 4$. Автомобиль массой 1000 килограммов при 10 метрах в секунду несёт $1000 \times 10 = 10\,000$ единиц движения; фургон массой 2000 килограммов при 20 метрах в секунду несёт $2000 \times 20 = 40\,000$, вчетверо больше, поэтому ему и нужно гораздо больше дороги, чтобы остановиться.

p	=	m	v
ИМПУЛЬС		МАССА	СКОРОСТЬ

1000 КГ  → 10 М/С

 10 000

ДОЛЬШЕ ТОРМОЗ

2000 КГ  → 20 М/С

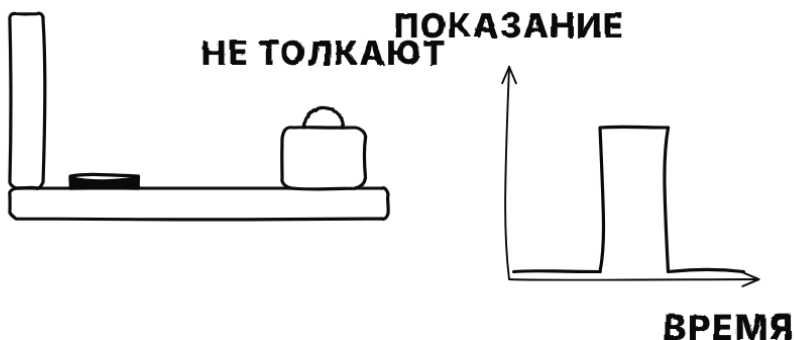
 40 000

Движение — масса на скорость

Третье определение даёт имя тому, что каждый чувствует, но никто не определял: *vis insita*, сила, рождённой в самой материи. Это способность сопротивления, по которой всякое тело, насколько может, сохраняет своё нынешнее состояние — покоя или равномерного движения по прямой. Ньютон настаивает, что она пропорциональна телу и что это не что иное, как инертность массы, увиденная с другой стороны. Лучшее его название для неё — *vis inertiae*, сила бездействия, и от него происходит наше слово «инерция». Тело проявляет эту силу только тогда, когда какая-то другая сила пытается изменить его состояние. Со стороны тела, которое стоит на месте, она выглядит как сопротивление; со стороны тела, которое напирает на другое, — как напор. И Ньютон предупреждает, что покой и движение, как их обычно мыслят, различаются лишь относительно; тела, которые кажутся покоящимися, не всегда покоятся истинно.

Опыт

Положите телефон плашмя на пассажирское сиденье автомобиля и откройте любое бесплатное приложение с датчиками, показывающее акселерометр. Пока машина ровно катится по прямой дороге, показание вдоль направления движения остаётся близким к нулю. Когда водитель тормозит, показание подскакивает, и незакреплённая сумка на сиденье съезжает вперёд. Ничто не толкало сумку вперёд; она просто продолжала двигаться, пока машину заставляли остановиться, — это и есть работа силы инерции.

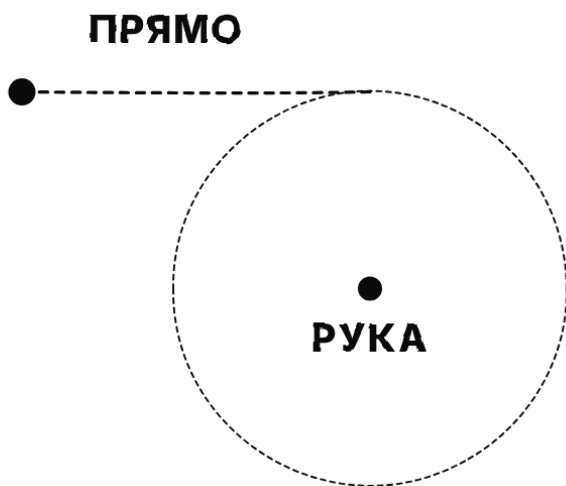


Сумка едет дальше

Четвёртое определение: приложенная сила есть действие на тело, меняющее его состояние покоя или равномерного прямолинейного движения. Она существует лишь пока длится действие, и ничего от неё в теле потом не остаётся; новое состояние тело сохраняет одной своей инерцией. Приложенные силы бывают от удара, от давления и от центростремительной силы. Тормозные колодки прижимаются лишь пока нажата педаль; когда машина замедлилась до новой скорости, она сохраняет эту скорость, хотя ничто уже не давит.

Пятое определение вводит силу, о которой вся книга: центростремительная сила притягивает или толкает тело к некоторой точке как к центру. Тяжесть — одна из них, она тянет

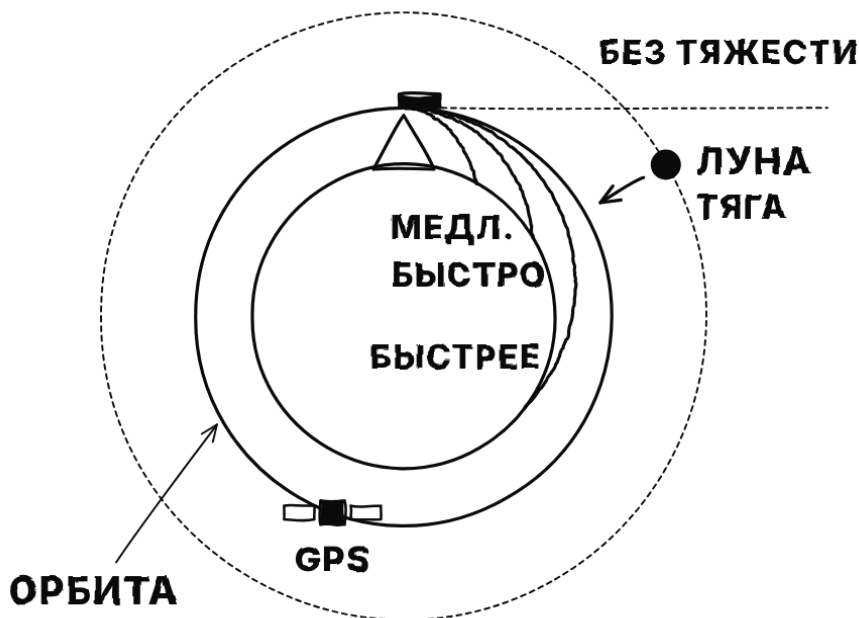
тела к центру Земли; магнетизм — другая, он тянет железо к магниту; такова и сила, какова бы она ни была, которая всё время загибает планеты с прямых линий на кривые орбиты. Образ Ньютона — камень, вращаемый в праче. Камень рвётся улететь от руки и натягивает прачу, тем сильнее, чем быстрее он движется, а в момент, когда его отпускают, улетает. Тягу прачи, всегда направленную назад к руке в центре круга, он и называет центростремительной силой — буквально силой, стремящейся к центру. Всякое тело, движущееся по любой орбите, покинуло бы её по прямой, равномерно, если бы такая сила его не удерживала.



Тяга к центру

Затем идёт самый знаменитый образ определений: пушка на вершине горы, стреляющая свинцовым ядром горизонтально.

Без тяжести и без воздуха ядро летело бы прямо вечно; тяжесть загибает его путь вниз, тем сильнее, чем оно тяжелее для своей массы, и тем слабее, чем быстрее оно выпущено. Ньютон даёт числа: если ядро падает в двух милях, то без воздуха двойная скорость унесёт его примерно на четыре мили, а десятикратная — примерно на двадцать. Правило за этим простое: ядро падает на одну и ту же высоту за одно и то же время при любой скорости, так что расстояние, которое оно пролетает до падения, растёт пропорционально скорости. Продолжайте увеличивать скорость, и путь становится всё более пологим, пока ядро не упадёт в 10, 30 или 90 градусах вокруг Земли, не облетит её целиком, прежде чем упасть, или не упадёт вовсе и не уйдёт дальше в небеса. Последний случай — не фантазия: каждый спутник GPS, которого слушает ваш телефон, — это ядро Ньютона, летящее вбок так быстро, что оно всё время падает вокруг Земли, никогда на неё не опускаясь.



Пушка Ньютона

Луна удерживается так же. Будь сила, тянущая её к Земле, слишком слаба, Луна уплыла бы по прямой; будь слишком сильна — её стянуло бы с орбиты вниз. Сила должна быть ровно такой величины, какая нужна для скорости, которую имеет Луна. И здесь Ньютон излагает программу всей своей книги: дело математиков — найти силу, удерживающую тело на данной орбите с данной скоростью, и, наоборот, найти кривой путь, по которому пойдёт тело, брошенное из данного места с данной скоростью под действием данной силы. Инженеры, выводящие спутник на орбиту, перед каждым запуском решают именно эти две задачи: силу по пути и путь по силе.

Запомним

Ньютон измеряет материю плотностью и объёмом вместе, так что двойная плотность в двойном объёме — это вчетверо больше материи, и это количество, пропорциональное весу, он называет массой. Количество движения — это масса и скорость вместе, так что двойная масса при двойной скорости — вчетверо больше движения. Инерция, *vis inertiae*, — это стремление тела сохранять своё состояние, а приложенная сила существует лишь пока действует. Центростремительная сила тянет к центру и превращает прямое движение в орбиту, как праща держит камень, а тяжесть — Луну. Выстрелите ядром достаточно быстро, и оно никогда не упадёт — так держится в небе каждый спутник, а находить силы по орбитам и орбиты по силам — задача, которую ставит себе книга.

Вопросы

1. По формуле $m = \rho V$: что станет с количеством материи, если плотность удвоить, а объём утроить?
 - a. Оно удвоится
 - b. Оно станет в пять раз больше
 - c. Оно станет в шесть раз больше
 - d. Оно не изменится, ведь масса не может меняться

2. Почему из опытов с маятниками Ньютон мог заключить, что масса пропорциональна весу?
- a. Тяжёлые грузы качаются быстрее, в ногу со своим весом
 - b. Маятники одной длины качаются за одно время, из чего бы ни были сделаны их грузы
 - c. Маятники с лёгкими грузами останавливаются раньше
 - d. Качание маятника прямо измеряет его плотность
3. Незакреплённая сумка съезжает вперёд, когда машина тормозит. Что, по словам лекции, происходит?
- a. Сумка продолжает двигаться своей *vis inertiae*, пока машину заставляют остановиться
 - b. Тормоза толкают сумку вперёд через сиденье
 - c. Сумку толкает показание акселерометра
 - d. Центростремительная сила тянет сумку к лобовому стеклу
4. Почему без воздуха дальность полёта ядра растёт пропорционально его скорости?
- a. На более быстрое ядро действует более слабая тяжесть
 - b. У более быстрого ядра больше инерции, и оно падает медленнее
 - c. Ядро падает с одной высоты за одно время при любой скорости, так что дальность растёт вместе со скоростью
 - d. Тяжесть действует, лишь когда ядро перестало лететь вперёд

Ответы

1. **с)** Плотность и объём перемножаются, так что двойная плотность в тройном объёме даёт дважды три, вшестеро больше материи, как говорит Ньютон о воздухе в тройном объёме.
2. **б)** Маятники одной длины с грузами из очень разных веществ качаются за одно и то же время, а это говорит ему, что вес растёт точно в ногу с массой.
3. **а)** Ничто не толкало сумку вперёд: она просто продолжала двигаться, пока машину заставляли остановиться, — это и есть работа силы инерции.
4. **с)** Ядро падает на одну и ту же высоту за одно и то же время при любой скорости, так что расстояние, которое оно пролетает до падения, растёт пропорционально скорости.

Разобранные примеры

Воздух двойной плотности Воздух двойной плотности заполняет двойной объём, а во втором случае — тройной. Во сколько раз больше исходного количества материи каждый раз, по формуле $m = \rho V$?

В $m = \rho V$ плотность и объём перемножаются.

Двойная плотность, двойной объём: $2 \times 2 = 4$, вчетверо больше материи.

Двойная плотность, тройной объём: $2 \times 3 = 6$, вшестеро больше материи.

Ответ: вчетверо и вшестеро

Ядро Ньютона Свинцовое ядро, выпущенное с горы параллельно земле, падает в двух милях. Как далеко оно улетит без воздуха при двойной и десятикратной скорости?

Без воздуха ядро падает на одну и ту же высоту за одно и то же время при любой скорости.

Значит, расстояние, которое оно пролетает до падения, пропорционально скорости.

Двойная скорость: $2 \times 2 = 4$ мили; десятикратная скорость: $10 \times 2 = 20$ миль.

Ответ: 4 мили и 20 миль

Задачи

1. По формуле $p = mv$: тело двойной массы движется вдвое быстрее другого. Во сколько раз больше его количество движения?

Подсказка: Перемножьте множитель для массы и множитель для скорости.

Ответ: Вчетверо: $2 \times 2 = 4$, как говорит Ньютон, — вчетверо.

2. Автомобиль массой 1000 килограммов движется со скоростью 10 метров в секунду, а фургон массой 2000 килограммов — 20 метров в секунду. Во сколько раз импульс фургона больше импульса автомобиля?

Подсказка: Вычислите $p = mv$ для каждого и поделите.

Ответ: Вчетверо: у автомобиля $1000 \times 10 = 10\,000$ единиц, у фургона $2000 \times 20 = 40\,000$ единиц.

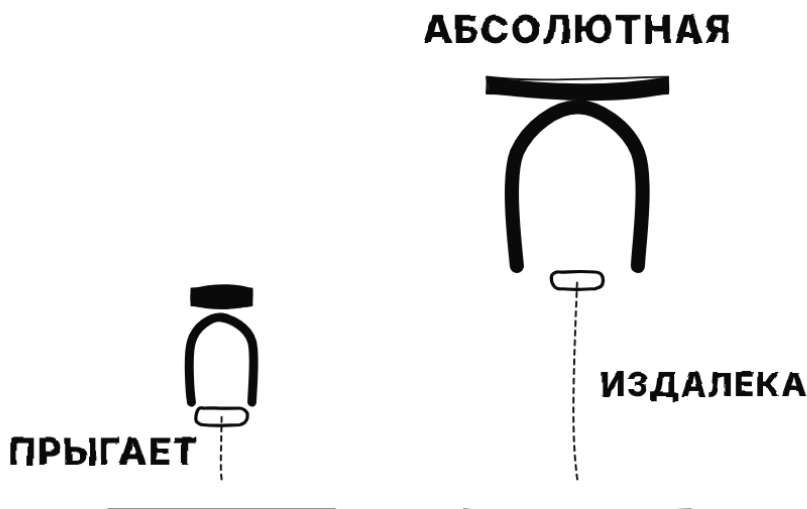
3. Без воздуха ядро, падающее в двух милях, выпускают с тройной скоростью. Как далеко оно улетит?

Подсказка: Дальность растёт пропорционально скорости, когда падение занимает одно и то же время.

Ответ: На шесть миль: тройная скорость уносит его втрое дальше, $3 \times 2 = 6$ миль.

Три способа измерить одну тягу

Держите маленький магнит для холодильника в нескольких сантиметрах над канцелярской скрепкой и медленно опускайте его. На какой-то высоте скрепка подскакивает и прилипает. Попробуйте снова с большим сильным магнитом — и скрепка подпрыгнет с гораздо большего расстояния. И с любым магнитом: чем ближе вы его держите, тем резче прыгает скрепка. Значит, у вопроса «насколько сильна тяга?» больше одного честного ответа, и Ньютон решает держать три из них порознь.

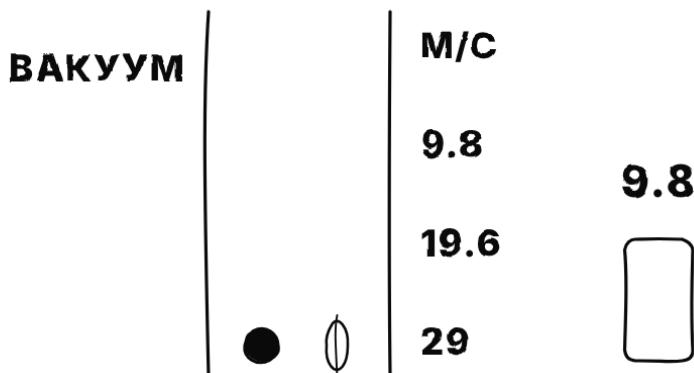


Маленький магнит, большой магнит

Первый — абсолютная величина центростремительной силы: мера самого источника, того, насколько мощна причина, посылающая тягу из центра в окружающее пространство. Словами: у большого сильного магнита больше абсолютной силы, чем у маленького слабого, что бы вы рядом с ним ни положили. Отдельной формулы для неё в отрывке нет; она просто сравнивает источники между собой. Компас вашего телефона чувствует магнетизм Земли в целом — источник куда сильнее любого магнита для холодильника, хотя он распределён так широко, что стрелка его едва замечает.

Второй — ускорительная величина: мера, пропорциональная скорости, которую тяга производит за данное время. Сегодня мы записали бы её как $a = \Delta v / \Delta t$, ускорение, где Δ , греческая буква «дельта», означает «изменение». Она говорит, как быстро тяга разгоняет вещи в данном месте, что бы туда ни поместили. Тот же магнит ускоряет сильнее вблизи, чем вдали, а тяжесть чуть сильнее в долине, чем на вершине очень высокой горы, и ещё слабее дальше от Земли. Но на одном и том же расстоянии от Земли, если учесть воздух, тяжесть одинаково разгоняет всякое падающее тело — тяжёлое или лёгкое, большое или малое. Расчёт: камень, брошенный у земли, набирает около 9,8 метра в секунду скорости каждую секунду, так что через 3 секунды он падает со скоростью около $9,8 \times 3 \approx 29$ метров в секунду, а перо в вакуумной трубке сделало бы точно то же. Акселерометр в вашем телефоне, неподвижно лежащем на столе, показывает те же 9,8 в любом месте на той же высоте, голый ли телефон или в тяжёлом чехле.

$$\text{УСКОРЕНИЕ } a = \frac{\Delta v \text{ ПРИРОСТ СКОР.}}{\Delta t \text{ ВРЕМЯ}}$$



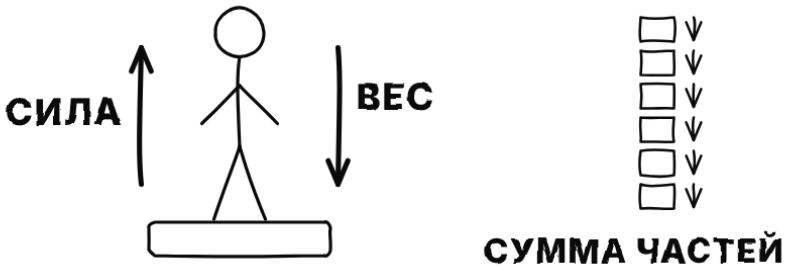
Ускорение: скорость за секунду

Третий — движущая величина: мера, пропорциональная движению, импульсу, который тяга производит за данное время. Это то, что Ньютон называет весом тела, всем его стремлением к центру, и оно всегда измеряется равной и противоположной силой, как раз достаточной, чтобы тело не падало. Весы в ванной делают ровно это: толкают вверх ровно настолько, чтобы вы не проваливались, и показывают, насколько сильно. У большего тела больше вес, а одно и то же тело весит больше вблизи Земли и меньше вдали от неё.

$$F = m a$$

$$W = m g$$

M: МАССА, G: 9,8



Вес — это масса на g

Ньютон связывает все три вместе. Движущая сила принадлежит телу как сумма стремлений всех его частей; ускорительная сила принадлежит месту как своего рода способность, распространённая от центра до каждой точки вокруг; а абсолютная сила принадлежит центру как та причина, что производит тягу. Этой причиной может быть центральное тело — магнит или Земля — или что-то пока неизвестное; он прямо говорит, что даёт лишь математическое понятие об этих силах, а не их физические причины.

Затем идёт ключевое соотношение: ускорительная сила относится к движущей, как скорость к количеству движения. Как движение есть скорость, умноженная на количество материи, так

и движущая сила есть ускорительная сила, умноженная на количество материи, что сегодня записывают как $F = ma$, а для веса — $W = mg$. Словами: тяга на всё тело — это тяга на каждую маленькую часть, сложенная по всем его частям. Вот почему вблизи Земли, где ускорительная тяжесть g одна для всего, вес просто пропорционален телу.

Собственный расчёт Ньютона поднимается выше. Пусть мы поднялись в область, где ускорительная тяжесть лишь вдвое меньше, чем здесь. Тело вдвое меньше весит там $\frac{1}{2} \times \frac{1}{2} = \frac{1}{4}$ веса большого тела здесь, вчетверо меньше; тело втрое меньше весит $\frac{1}{2} \times \frac{1}{3} = \frac{1}{6}$, вшестеро меньше. На высоте спутников GPS, примерно в двадцати тысячах километров, ускорительная тяжесть намного ниже тех 9,8, что чувствуем мы, так что спутник там весит лишь малую долю того, что весил на стартовом столе, хотя масса его точно та же.



ЗДЕСЬ: 1

G $\frac{1}{2}$  $\frac{1}{2} \times \frac{1}{2} = \frac{1}{4}$

G $\frac{1}{2}$  $\frac{1}{2} \times \frac{1}{3} = \frac{1}{6}$

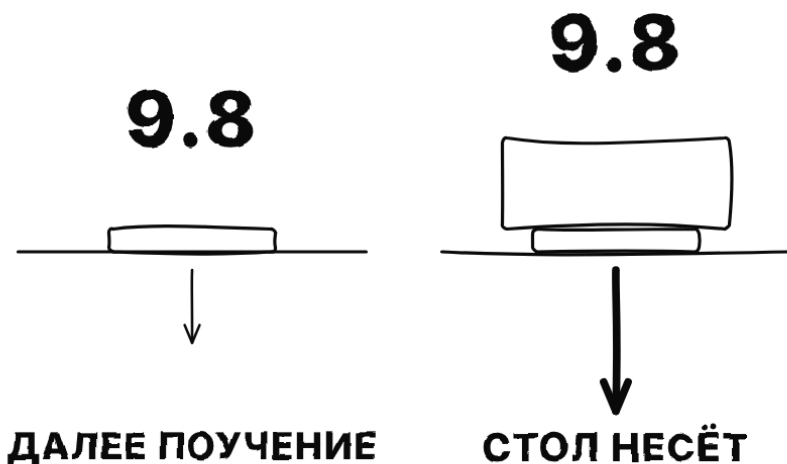


GPS

Половина g, меньшие тела

Опыт

Положите телефон плашмя на стол и откройте бесплатное приложение с датчиками, показывающее акселерометр. Заметьте показание, направленное вверх от стола, — около 9,8 метра в секунду за секунду. Теперь положите на телефон тяжёлую книгу и посмотрите снова: показание не меняется. Ускорительная величина принадлежит месту, а не телу; вес книги изменил то, что несёт стол, а не ускорение, которое там даёт тяжесть.



Книга не меняет g

Ньютон добавляет предупреждение о словах: притяжения и толчки он будет называть ускорительными и движущими в том же смысле и употреблять «притяжение», «толчок» и «стремление к центру» как равнозначные. Он не берётся сказать, что это за силы и как они действуют, и не утверждает, что центр, который есть лишь математическая точка, действительно что-то притягивает. И здесь определения кончаются и начинается длинное примечание — поучение. Время, пространство, место и движение, говорит он, не нуждаются в определении, будучи известны всем; но обычные люди мыслят их лишь через вещи, которые можно увидеть и потрогать, и это порождает предрассудки. Чтобы их устранить, он отделит абсолютное от

относительного, истинное от кажущегося, математическое от обыденного.

Запомним

Тягу к центру можно измерить тремя способами: мощностью её источника — абсолютная величина; тем, как быстро она разгоняет вещи в данном месте, — ускорительная величина; и движением, которое она производит во всём теле, — движущая величина, то есть вес. Движущая сила есть ускорительная сила на количество материи, как движение есть скорость на количество материи, так что там, где ускорение тяжести одинаково, вес просто пропорционален телу. Там, где тяжесть вдвое меньше, тело вдвое или втрое меньше весит вчетверо или вшестеро меньше. На одном расстоянии от Земли тяжесть одинаково ускоряет всякое тело, что и показывает акселерометр телефона, лежит на нём книга или нет. Ньютон придаёт этим силам лишь математический смысл и переходит к тому, чтобы отделить истинные время, пространство и движение от их повседневных мер.

Вопросы

1. Акселерометр телефона показывает те же 9,8 с тяжёлой книгой сверху и без неё. Какую из трёх величин Ньютона показывает это значение?

- a. Движущую величину, которая растёт вместе с телом
 - b. Ускорительную величину, которая принадлежит месту
 - c. Абсолютную величину, которая принадлежит источнику
 - d. Количество движения книги
2. По формуле $F = ma$: почему вблизи поверхности Земли вес просто пропорционален телу?
- a. Потому что у всех тел там одинаковая масса
 - b. Потому что ускорительная тяжесть g там для всего одна
 - c. Потому что вес не зависит от тяжести
 - d. Потому что движущая сила у всех тел одинакова
3. Какая величина измеряет мощность источника тяги, что бы рядом с ним ни находилось?
- a. Движущая величина
 - b. Ускорительная величина
 - c. Абсолютная величина
 - d. Количество движения
4. В области, где ускорительная тяжесть вдвое меньше, как вес тела втрое меньшего соотносится с весом большего тела здесь?
- a. Втрое меньше
 - b. Впятеро меньше
 - c. Вшестеро меньше
 - d. Вдевятиро меньше

Ответы

1. **б)** Ускорительная величина принадлежит месту, а не телу; вес книги изменил то, что несёт стол, а не ускорение, которое там даёт тяжесть.
2. **б)** Вблизи Земли ускорительная тяжесть g для всего одна и та же, так что вес $W = mg$ растёт пропорционально одному лишь количеству материи.
3. **с)** Абсолютная величина — мера самого источника, того, насколько мощна причина, посылающая тягу из центра.
4. **с)** Вес — это масса на ускорительную тяжесть, так что треть массы на половину тяжести даёт шестую часть, вшестеро меньше.

Разобранные примеры

Вес там, где тяжесть вдвое меньше Там, где ускорительная тяжесть вдвое меньше, чем здесь, сколько весят тела вдвое и втрое меньшие в сравнении с большим телом здесь?

Вес $W = mg$: количество материи на ускорительную тяжесть.

Вдвое меньше и половина тяжести: $\frac{1}{2} \times \frac{1}{2} = \frac{1}{4}$, вчетверо меньше.

Втрое меньше и половина тяжести: $\frac{1}{3} \times \frac{1}{2} = \frac{1}{6}$, вшестеро меньше.

Ответ: вчетверо меньше и вшестеро меньше

Задачи

1. Камень, брошенный у земли, каждую секунду набирает около 9,8 метра в секунду скорости. С какой скоростью он падает через 2 секунды, если не учитывать воздух?

Подсказка: Ускорительная величина — это скорость, набираемая за секунду; умножьте на время.

Ответ: Около 19,6 метра в секунду: $9,8 \times 2 = 19,6$.

2. Там, где ускорительная тяжесть вдвое меньше, тело вчетверо меньше тела здесь. Во сколько раз меньше оно весит?

Подсказка: Воспользуйтесь $W = mg$ и перемножьте две дроби.

Ответ: В восемь раз меньше: $\frac{1}{4} \times \frac{1}{2} = \frac{1}{8}$.

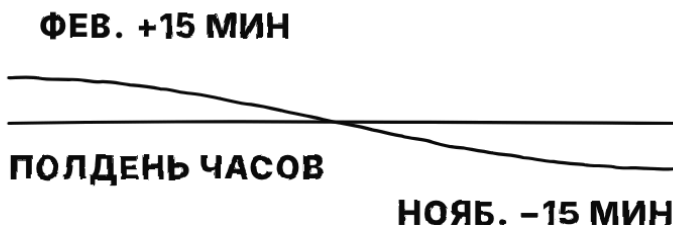
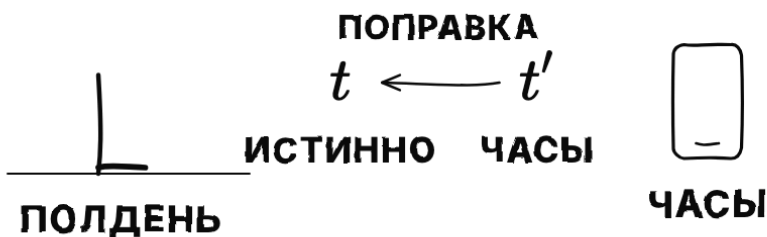
3. Вблизи Земли у одного тела втрое больше количества материи, чем у другого. Как соотносятся их веса?

Подсказка: Вблизи Земли g для обоих одно и то же, так что $W = mg$ зависит только от m .

Ответ: Втрое больший вес: при том же g вес пропорционален количеству материи.

Истинное время, истинное пространство и матрос

Поставьте в саду солнечные часы или просто воткните в землю палку и отмечайте каждый день миг, когда её тень самая короткая: местный полдень. Сравните его с часами телефона в течение года. По сравнению с ровными часами полдень тени в течение года смещается: в феврале он наступает примерно на четверть часа позже своего среднего времени, в начале ноября — примерно на четверть часа раньше. Так какой же полдень настоящий и что такое сутки, если солнечные сутки не все одной длины?

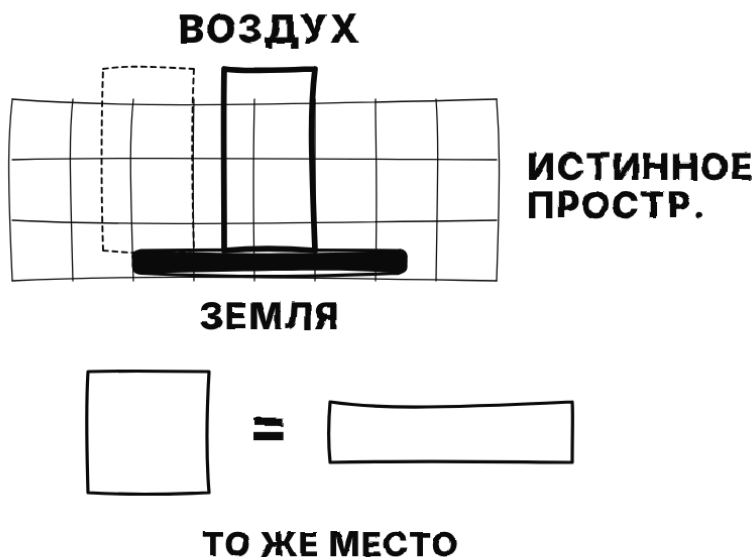


Полдень по тени и полдень по часам

Поучение Ньютона отвечает, разделяя время надвое. Абсолютное, истинное, математическое время течёт равномерно само по себе, безотносительно к чему-либо внешнему, и другое его имя — длительность. Относительное, обыденное время — это любая видимая мера длительности, сделанная каким-то движением: час, день, месяц, год, точная или нет. Символами истинное время можно записать как t , а измеренное — как t' , читается «тэ штрих»; часы дают t' , и лишь после поправки они сообщают t . Часы вашего телефона — это t' : они считают колебания кварцевого кристалла и поправляются по атомным часам спутников, но всё равно остаются движением, которым измеряют время.

Затем пространство. Абсолютное пространство по своей природе всегда остаётся одинаковым и никогда не движется.

Относительное пространство — его подвижная мера, устанавливаемая чувствами по его положению среди тел, как пространство под землёй, воздух или небо, отмеряемые от Земли. У них одинаковые форма и размер, но они не обязаны оставаться одним и тем же куском пространства: если Земля движется, то воздух, сохраняющий то же положение вокруг нас, абсолютно говоря, проходит одну часть пространства за другой.



Истинное пространство и места

Место — это часть пространства, которую заполняет тело, абсолютное или относительное в зависимости от пространства. Это часть пространства, а не положение тела и не его внешняя

поверхность: равные тела всегда имеют равные места, хотя их поверхности при разной форме часто неравны. Положения не имеют величины; это скорее свойства мест, чем места. А поскольку движение целого есть сумма движений его частей, то и место целого есть сумма мест его частей, внутри всего тела.

Затем движение. Абсолютное движение — это переход тела из одного абсолютного места в другое; относительное движение — переход из одного относительного места в другое. На корабле под парусами относительное место тела — это часть корабля, которую оно заполняет и которая движется вместе с кораблём, а относительный покой — пребывание в этой части. Истинным покоем было бы пребывание в одной и той же части неподвижного пространства, сквозь которое несётся корабль со всем, что в нём есть. Так что если Земля истинно покоится, то тело, покоящееся на корабле, на самом деле движется со скоростью корабля относительно Земли; а если движется и Земля, то истинное движение тела складывается из движения Земли, движения корабля по Земле и собственного движения тела на корабле.

→ **ЗЕМЛЯ 10 010**

← **КОРАБЛЬ 10**

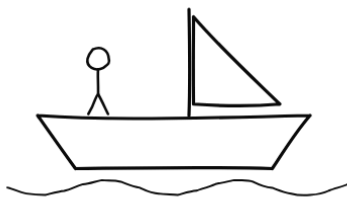
→ **МАТРОС 1**

$$v = 10\ 010 - 10 + 1 = 10\ 001$$

ИСТИННО, НА В

$$-10 + 1 = -9$$

ПО ЗЕМЛЕ: 9 НА З



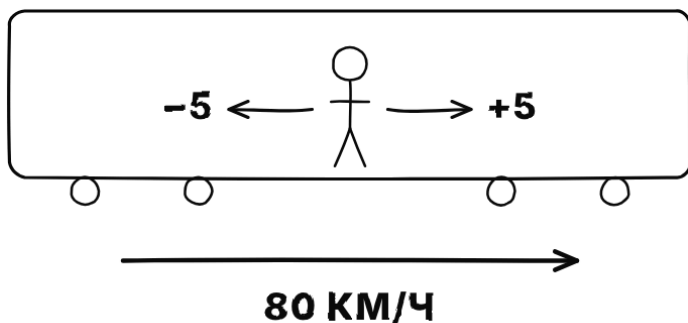
Скорость матроса

Ньютон даёт числа. Пусть часть Земли под кораблём истинно движется на восток со скоростью в 10 010 частей, корабль плывёт на запад со скоростью в 10 частей, а матрос идёт по кораблю на восток со скоростью в 1 часть. Если считать восток положительным, истинная скорость матроса $v = 10\ 010 - 10 + 1 = 10\ 001$ часть на восток. Словами: скорости вдоль одной линии просто складываются, каждая измеренная от того, что её несёт. Его скорость относительно Земли не включает долю самой Земли: $-10 + 1 = -9$, девять частей на запад. Так что один и тот же матрос мчится сквозь пространство на восток, одновременно дрейфуя вдоль берега на запад. GPS телефона показывает как раз число второго рода: вашу скорость относительно земли, которая совсем не включает собственное движение Земли.

Опыт

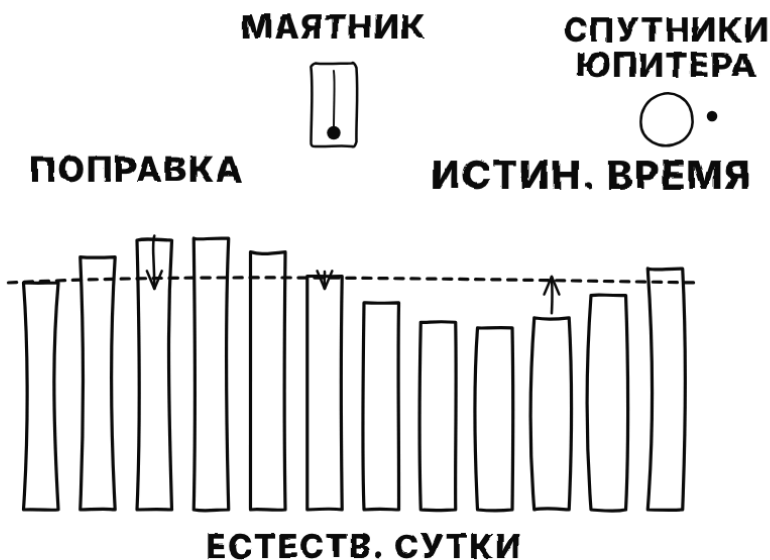
Пройдитесь вперёд по проходу движущегося поезда с открытым приложением, показывающим скорость по GPS. Приложение покажет скорость поезда плюс ваш шаг, скажем 80 километров в час плюс 5, то есть 85. Идите назад — и оно покажет 80 минус 5, то есть 75. Приложение складывает скорости вдоль линии, точно как Ньютон с матросом, и останавливается на земле, никогда не включая собственное движение Земли.

НАЗАД: 75 ВПЕРЁД: 85



Ходьба в поезде

Вернёмся ко времени, где на практике границу проводит астрономия. Абсолютное время отделяется от относительного уравнением, или поправкой, обыденного времени. Естественные сутки, от солнца до солнца, на самом деле неравны, хотя люди считают их равными и измеряют ими время; астрономы исправляют это неравенство, чтобы точно вычислять небесные движения. Эту поправку и показали ваши солнечные часы: около четверти часа в ту или другую сторону в разные времена года.



Естественные сутки неравны

Может быть, добавляет Ньютон, ни одно движение не бывает совершенно равномерным, так что время никогда нельзя измерить точно; всякое движение может ускоряться или замедляться, но течение истинного времени измениться не

может. Длительность вещей одна и та же, быстры ли их движения, медленны или их нет вовсе, так что длительность надо отличать от её видимых мер и восстанавливать из них поправкой астрономов. Необходимость поправки доказывают две вещи: опыты с маятниковыми часами и затмения спутников Юпитера, сроки которых сходятся лишь после того, как неравные сутки исправлены. Часы спутников, по которым идут часы вашего телефона, поправляют в том же духе, чтобы то, что они считают, совпадало с ровным временем, которое нужно для расчётов.

Запомним

Истинное время течёт равномерно само по себе, а всякие часы — сутки, маятник или ваш телефон — лишь движение, которым его измеряют. Истинное пространство никогда не движется; пространства, которые мы измеряем, заданы телами и, быть может, путешествуют сквозь него. Место — это часть пространства, которую заполняет тело, и истинное движение — это переход между местами истинного пространства, а относительное движение измеряется по движущемуся окружению. Матрос Ньютона движется на 10 010 минус 10 плюс 1, то есть истинно на 10 001 часть на восток, и при этом на 9 частей на запад относительно Земли. Астрономы восстанавливают истинное время из неравных естественных суток поправкой, необходимость которой показывают маятниковые часы и затмения спутников Юпитера.

Вопросы

1. Часы вашего телефона называют t' , а не t . Почему?
 - a. Потому что они всегда ошибаются
 - b. Потому что это мера длительности, сделанная каким-то движением, а не само истинное время
 - c. Потому что они измеряют пространство, а не время
 - d. Потому что они считают только сутки
2. Что такое относительный покой тела на движущемся корабле?
 - a. Пребывание в одной и той же части неподвижного пространства
 - b. Пребывание в одной и той же части корабля, которая движется вместе с кораблём
 - c. Движение со скоростью корабля относительно Земли
 - d. Движение против ветра
3. Земля движется на восток со скоростью в 10 010 частей, корабль на запад — в 10, матрос по кораблю на восток — в 1. Какова скорость матроса относительно Земли?
 - a. 10 001 часть на восток
 - b. 11 частей на запад
 - c. 9 частей на запад
 - d. 1 часть на восток
4. Что, по Ньютону, показывают маятниковые часы и затмения спутников Юпитера?

- a. Что абсолютного времени не существует
- b. Что поправка неравных естественных суток необходима
- c. Что Земля покоится
- d. Что все движения совершенно равномерны

Ответы

1. **b)** Относительное время — это любая видимая мера длительности, сделанная каким-то движением; телефон считает колебания кристалла, так что даёт t' , которое лишь после поправки сообщает t .
2. **b)** Относительное место тела — это часть корабля, которую оно заполняет и которая движется вместе с кораблём, а относительный покой — пребывание в этой части.
3. **c)** Относительно Земли доля самой Земли выпадает: $-10 + 1 = -9$, девять частей на запад.
4. **b)** Необходимость поправки доказывают две вещи: опыты с маятниковыми часами и затмения спутников Юпитера.

Разобранные примеры

Две скорости матроса Часть Земли под кораблём движется на восток со скоростью в 10 010 частей, корабль плывёт на запад со скоростью в 10 частей, а матрос идёт по кораблю на восток со скоростью в 1 часть. Найдите истинную скорость матроса и его скорость относительно Земли.

Считаем восток положительным; скорости вдоль одной линии складываются, каждая измеренная от того, что её несёт.

Истинная скорость: $v = 10\ 010 - 10 + 1 = 10\ 001$ часть, на восток.

Относительно Земли отбросим долю Земли: $-10 + 1 = -9$, то есть 9 частей на запад.

Ответ: истинно 10 001 часть на восток; 9 частей на запад относительно Земли

Задачи

1. Пусть Земля по-прежнему движется на 10 010 частей на восток, а корабль на 10 на запад, но матрос идёт на запад со скоростью в 1 часть. Каковы его истинная и относительная скорости?

Подсказка: Считайте восток положительным и сложите три скорости.

Ответ: Истинная: $10\,010 - 10 - 1 = 9\,999$ частей на восток.
Относительно Земли: $-10 - 1 = -11$, то есть 11 частей на запад.

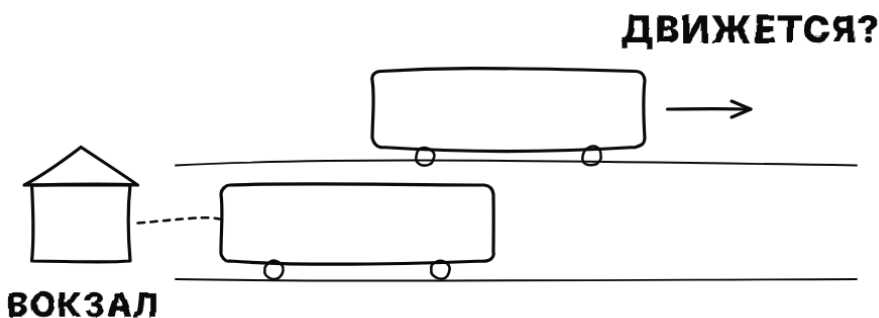
2. Поезд идёт со скоростью 80 километров в час, а вы идёте к голове поезда со скоростью 5. Какую скорость покажет приложение GPS и что оно не учитывает?

Подсказка: Сложите скорости вдоль линии, измеренные от земли.

Ответ: 85 километров в час: $80 + 5$. Оно не учитывает собственное движение Земли, потому что измеряет лишь относительно земли.

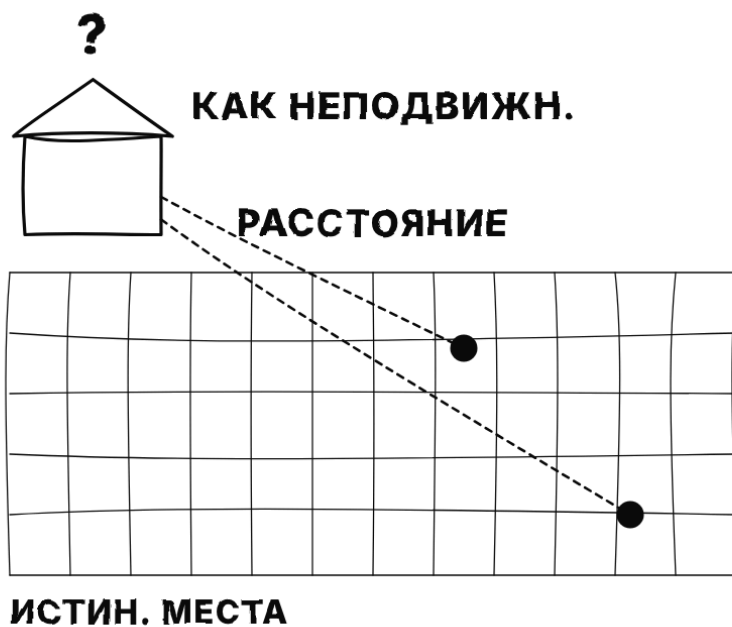
Почему истинное движение не прочесть по соседям

Сядьте в поезд у платформы, пока трогается поезд на соседнем пути. Несколько секунд вы готовы поклясться, что движетесь вы, пока не взглянете на часовую башню вокзала и не увидите, что ничего не изменилось. Ваши глаза сравнили вас с ближайшей большой вещью, а ближайшая большая вещь двигалась. Ньютон спрашивает, может ли хоть какое-нибудь сравнение с соседями решить, кто движется по-настоящему, и его ответ — нет.



Кто движется?

Он начинает с порядка. Части времени вечно сохраняют свой порядок: этот миг никогда не меняется местами со следующим. Части пространства так же неизменны: сдвинуть часть пространства с её места значило бы, как говорит Ньютон, сдвинуть её с самой себя, потому что времена и пространства — это места и самих себя, и всего остального. Всё находится во времени в порядке следования и в пространстве в порядке расположения, так что это и есть истинные, абсолютные места, и уход из них — единственное истинное движение.

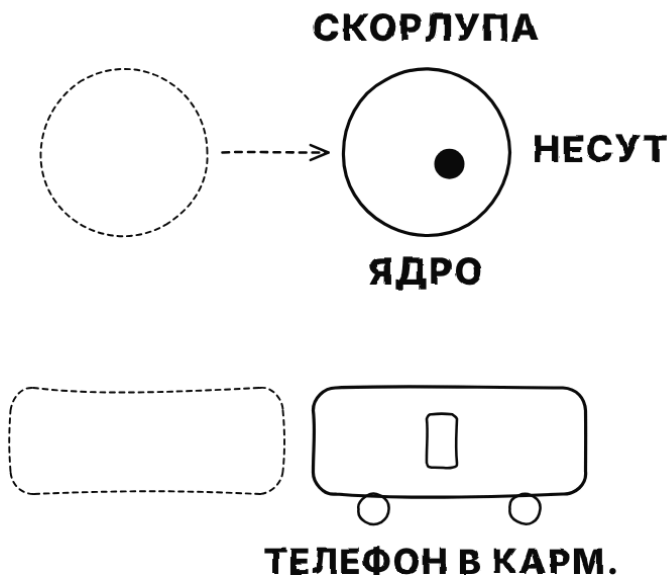


Места, отмеряемые от тела

Беда в том, что части пространства мы не видим и не можем отличить одну от другой. Поэтому мы выбираем тело, которое считаем неподвижным, — вокзал, землю, берег — и определяем

каждое место по расстояниям и направлениям от этого тела; затем судим о каждом движении по этим местам. В повседневной жизни это не вредит. Но в натуральной философии, говорит Ньютон, нужно смотреть сквозь наши чувства на сами вещи, потому что нигде может не оказаться тела, истинно покоящегося, от которого можно было бы мерить. Карта в вашем телефоне делает ровно это: отмеряет каждое положение от земли под ногами, принятой за неподвижную, — это прекрасно работает, чтобы найти кафе, и ничего не говорит о том, как движется сама Земля.

Он обещает отличать истинное движение от относительного по их свойствам, причинам и действиям и начинает со свойств. Первое свойство: тела, истинно покоящиеся, покоятся друг относительно друга. Среди далёких неподвижных звёзд или далеко за ними может быть тело, истинно покоящееся; но по положениям тел в нашей части мира мы никогда не узнаем, сохраняет ли какое-либо из них неизменное положение по отношению к нему. Так что истинный покой нельзя найти по положениям близких тел.



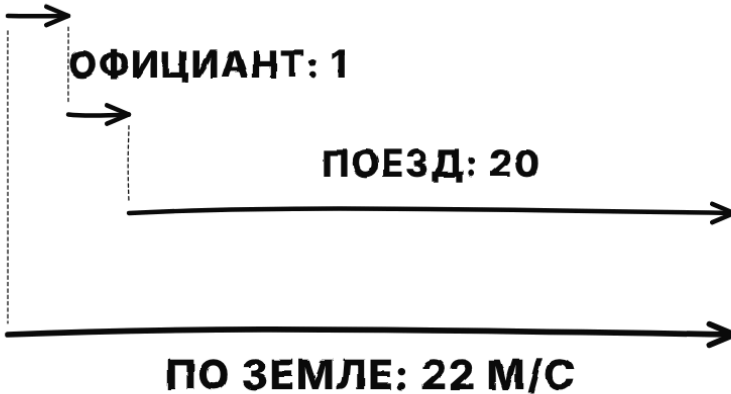
Двигается скорлупа — движется и ядро

Второе свойство: части, сохраняющие неизменное положение внутри целого, разделяют движение целого. Каждая часть вращающегося тела стремится прочь от оси, а напор движущегося тела вперёд есть сумма напоров его частей. Так что если окружающие тела движутся, то всё, что покоится среди них, движется вместе с ними. Вот почему истинное движение нельзя найти, наблюдая тело на фоне вещей, которые лишь кажутся покоящимися: эти вещи должны были бы покоиться истинно. Образ Ньютона — скорлупа и её ядро: если движется скорлупа, движется и ядро как часть целого, ни на миг не удаляясь от скорлупы. Телефон, неподвижно лежащий в вашем кармане в едущем автобусе, — это ядро; автобус — скорлупа, и телефон едет вместе с ним, хотя никогда не сдвигается в кармане.

Третье свойство следует вплотную: если место движется, всё, что в нём находится, движется вместе с ним, так что тело, движущееся из движущегося места, разделяет и движение места. Поэтому всякое движение, измеренное от движущегося места, — лишь часть целого, истинного движения. Целое складывается шаг за шагом: движение тела внутри его места плюс движение этого места внутри его собственного места и так далее, пока не дойдём до какого-нибудь неподвижного места, как с матросом, которого мы встречали. Символами, где каждое движение измерено от места, которое его несёт: $v_{\text{истин}} = v_1 + v_2 + v_3 + \dots$. Словами: истинное движение есть сумма всех вложенных движений, вплоть до места, которое не движется. Расчёт: чашка кофе скользит вперёд по подносу со скоростью 1 метр в секунду, официант идёт вперёд по поезду со скоростью 1 метр в секунду, а поезд идёт со скоростью 20 метров в секунду относительно земли, так что относительно земли чашка движется со скоростью $1 + 1 + 20 = 22$ метра в секунду, и это ещё не её истинное движение, потому что сама земля тоже несётся.

$$v_{true} = v_1 + v_2 + v_3 + \dots$$

ЧАШКА: 1

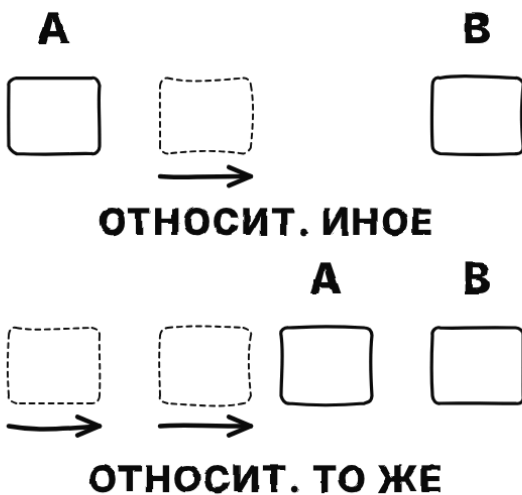


Истинное движение — это сумма

Так что целые, истинные движения можно закрепить лишь относительно неподвижных мест, — вот почему Ньютон относил истинное движение к неподвижным местам, а относительное — к подвижным. А неподвижны лишь те места, которые от бесконечности до бесконечности все сохраняют одно и то же положение друг относительно друга; вместе они составляют неподвижное пространство.

Затем идут причины. Истинное движение от относительного отличает сила, приложенная к телу. Истинное движение никогда не возникает и не меняется иначе как силой, приложенной к самому телу. Относительное движение может возникнуть или измениться вовсе без силы на тело: достаточно толкнуть тела, с

которыми его сравнивают, чтобы они отодвинулись и соотношение изменилось. Верно и обратное: сила, приложенная к телу, всегда меняет его истинное движение, но его относительное движение может не измениться, если та же сила приложена к телам, с которыми его сравнивают, так что их взаимные положения остаются прежними. Когда ваш автобус тормозит, телефон в вашем кармане и вы замедляетесь вместе; относительно вас телефон вовсе не движется, хотя его истинное движение явно изменилось.



Толкните другое тело

Так что относительное движение может меняться, пока истинное остаётся прежним, и оставаться прежним, пока истинное

меняется. Истинное движение, включает Ньютон, просто не состоит в таких соотношениях.

Запомним

Части времени и пространства вечно сохраняют свой порядок, и уход из этих истинных мест — единственное истинное движение. Поскольку части пространства мы не видим, мы мерим от тел, которые считаем неподвижными, — в повседневной жизни это работает, но истинного покоя не выдаёт. Части разделяют движение своего целого, как ядро движется со скорлупой, и истинное движение есть сумма вложенных движений вплоть до неподвижного места. Сила, приложенная к телу, всегда меняет его истинное движение, а его относительное движение может измениться без всякой силы на него или остаться прежним вопреки ей. Так что истинное движение не состоит в соотношениях с другими телами.

Вопросы

1. Почему истинный покой нельзя найти по положениям близких тел?
 - а. Потому что близкие тела всегда движутся
 - б. Потому что истинно покоящееся тело может быть далеко за звёздами, а близкие положения не покажут, неподвижны ли тела по отношению к нему

- с. Потому что положения нельзя измерить
 - д. Потому что покоя не существует
2. Что показывает образ скорлупы и ядра у Ньютона?
- а. Что ядро движется, лишь если покидает скорлупу
 - б. Что части, сохраняющие неизменное положение внутри целого, разделяют его движение
 - с. Что скорлупа движется быстрее ядра
 - д. Что истинное движение есть только у скорлупы
3. По формуле $v_{\text{истин}} = v_1 + v_2 + v_3 + \dots$: чашка скользит со скоростью 1 м/с по подносу, официант идёт со скоростью 1 м/с по поезду, а поезд идёт со скоростью 20 м/с. Какова скорость чашки относительно земли?
- а. 20 метров в секунду
 - б. 21 метр в секунду
 - с. 22 метра в секунду
 - д. 2 метра в секунду
4. Как относительное движение тела может измениться без силы, приложенной к нему?
- а. Никак: относительному движению нужна сила на тело
 - б. Если толкнуть тела, с которыми его сравнивают, так что соотношение изменится
 - с. От течения абсолютного времени
 - д. От собственной инерции тела

Ответы

1. **б)** Среди далёких неподвижных звёзд или за ними может быть тело, истинно покоящееся, но по положениям тел в нашей части мира мы никогда не узнаем, сохраняет ли какое-либо из них неизменное положение по отношению к нему.
2. **б)** Если движется скорлупа, движется и ядро как часть целого, ни на миг не удаляясь от скорлупы.
3. **с)** Каждое движение измерено от места, которое его несёт, и вложенные движения складываются: $1 + 1 + 20 = 22$ метра в секунду.
4. **б)** Относительное движение может возникнуть или измениться без силы на тело: достаточно толкнуть тела, с которыми его сравнивают, чтобы они отодвинулись и соотношение изменилось.

Разобранные примеры

Вложенные движения в поезде Чашка кофе скользит вперёд по подносу со скоростью 1 метр в секунду, официант идёт вперёд по поезду со скоростью 1 метр в секунду, а поезд идёт относительно земли со скоростью 20 метров в секунду. Найдите скорость чашки относительно земли.

Истинное движение складывается из вложенных движений, каждое измерено от места, которое его несёт.

Сложим их: $v = 1 + 1 + 20$.

Получается 22 метра в секунду относительно земли; собственное движение земли всё ещё не учтено.

Ответ: 22 метра в секунду относительно земли

Задачи

1. Теперь официант идёт по поезду назад со скоростью 1 метр в секунду, а чашка по-прежнему скользит вперёд по подносу со

скоростью 1 метр в секунду; поезд идёт со скоростью 20 метров в секунду. Какова скорость чашки относительно земли?

Подсказка: Считайте направление вперёд положительным и сложите три вложенных движения.

Ответ: 20 метров в секунду: $1 - 1 + 20 = 20$.

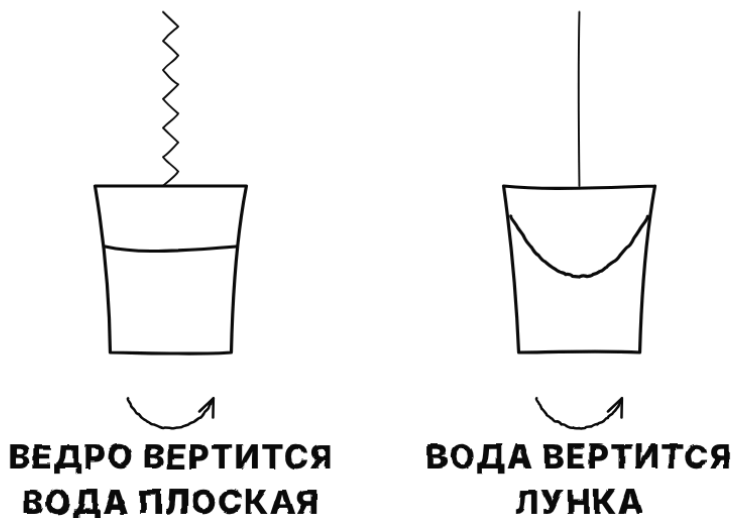
2. Объясните, почему сила, приложенная к телу, всегда меняет его истинное движение, но не обязательно — относительное.

Подсказка: Подумайте, что будет, если тела, с которыми его сравнивают, толкнуть так же.

Ответ: Истинное движение меняется лишь от силы на само тело, так что сила на него всегда его меняет. Но если те же силы действуют на тела, с которыми его сравнивают, их взаимные положения остаются прежними, и относительное движение не меняется.

Ведро, два шара и цель книги

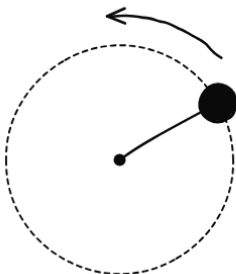
Подвесьте маленькое ведро с водой на длинной верёвке, закрутите верёвку много раз, удержите ведро неподвижным, а потом отпустите. Пока верёвка раскручивается, ведро вертится всё быстрее, но некоторое время вода внутри остаётся плоской. Затем мало-помалу вода начинает вращаться, её середина опускается, и она взбирается по стенкам, образуя лунку, пока вода и ведро не завертятся вместе. Ньютон проделал этот опыт сам, и это то действие, которое окончательно отделяет истинное движение от относительного.



Действия, отличающие абсолютное движение от относительного, говорит он, — это силы удаления от оси кругового движения, стремление наружу всего, что вращается. Чисто относительное кружение такого стремления не производит; истинное кружение производит его больше или меньше, смотря по тому, сколько кругового движения. Сегодня мы описываем это стремление формулой силы, нужной, чтобы масса m двигалась со скоростью v по кругу радиуса r : $F = mv^2/r$. Словами: чем быстрее что-то кружит и чем теснее его круг, тем сильнее оно тянет наружу, и тяга растёт как квадрат скорости. Наглядно — это праща, которую мы встретили в начале: раскрутите камень вдвое быстрее, и праща тянет вчетверо сильнее. Расчёт: мяч массой 1 килограмм, раскручиваемый со скоростью 2 метра в секунду на верёвке длиной 1 метр, тянет с силой $1 \times 2^2 / 1 = 4$ ньютона; при 4 метрах в секунду — с силой $1 \times 4^2 / 1 = 16$ ньютонов.

$$F = \frac{m v^2}{r}$$

**F: ТЯГА, М: МАССА
V: СКОР., R: РАДИУС**



$$V = 2: F = 4 \text{ Н}$$

$$V = 4: F = 16 \text{ Н}$$

Тяга наружу: $F = mv^2/r$

Теперь посмотрите на ведро с этим в голове. Сначала вода быстрее всего двигалась относительно ведра, ведь ведро вертелось вокруг неподвижной воды, но её поверхность оставалась плоской: нет стремления наружу — значит, истинного кружения ещё нет. Позже, когда вода догнала ведро и её движение относительно ведра уменьшилось, она полезла по стенкам и поднялась выше всего ровно тогда, когда вращалась вместе с ведром и покоилась относительно него. Подъём воды следует за её истинным кружением, которое здесь прямо противоположно её относительному движению, и этим стремлением его даже можно измерить. Для жидкости, вращающейся как одно целое, сегодняшняя формула подъёма у края над центром — $h = \omega^2 r^2 / (2g)$, где ω , греческая буква

«омега», — скорость вращения в радианах в секунду, а g — это 9,8 тяжести. При 2 оборотах в секунду ω около 12,6, так что в ведре радиусом 0,1 метра край поднимается примерно на $12,6^2 \times 0,1^2 / (2 \times 9,8) \approx 0,08$ метра, около 8 сантиметров.



Стремление следует за истинным вращением

Так что стремление не зависит ни от какого движения воды относительно окружающих вещей, и истинное круговое движение нельзя определить таким движением. У каждого вращающегося тела лишь одно истинное круговое движение, которому соответствует одно стремление наружу — его собственное действие. Но относительных движений у него бесчисленное множество — по одному на каждое тело, с которым его можно сравнить, — и, как и всякие простые соотношения, у

них нет действительного действия, кроме того, что они причастны к тому единственному истинному движению. Это решает судьбу старой картины небес, в которой планеты покоятся внутри вращающихся сфер под неподвижными звёздами и уносятся ими по кругу: эти планеты всё равно истинно двигались бы, раз меняют положение друг относительно друга, чего истинно покоящиеся тела никогда не делают, и как части вращающегося целого стремятся прочь от его оси. Режим отжима в стиральной машине показывает это стремление в полную силу: истинное вращение барабана так сильно прижимает бельё к стенке, что вода вылетает через отверстия.

Опыт

Энергично размешайте чашку чая и выньте ложку. Пока чай вращается, его поверхность прогибается в середине и поднимается у края. Посмотрите со своего стула, потом с другой стороны стола: лунка выглядит совершенно одинаково, потому что принадлежит истинному вращению чая, а не вашей точке зрения.

Из всего этого Ньютон извлекает урок о словах. Относительные величины — не те величины, имена которых они носят, а их видимые меры, точные или нет, которыми люди обычно пользуются вместо них. Если слова значат то, что им придаёт обычное употребление, то под словами «время», «пространство», «место» и «движение» следует понимать эти меры, а употреблять их для истинных величин — необычно и чисто математически. Так что те, кто вчитывает истинные величины в Священное Писание, насилуют его, а те, кто смешивает действительные

величины с их соотношениями и обыденными мерами, портят чистоту математической и философской истины.

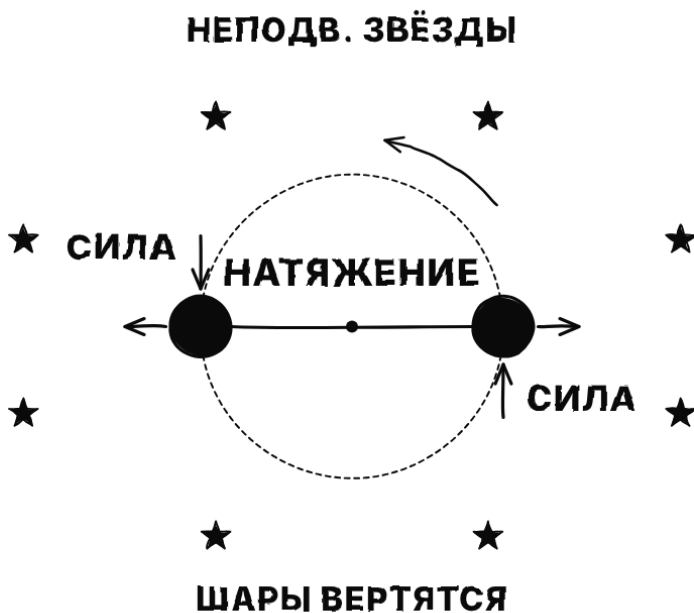
ВЕЛИЧИНЫ $\neq$ МЕРЫ



Величины и их меры

Найти истинные движения отдельных тел очень трудно, признаёт Ньютон, потому что части неподвижного пространства никогда нельзя увидеть. Но это не безнадежно, потому что есть два рода подсказок: кажущиеся движения, которые суть разности истинных движений, и силы, которые суть их причины и действия. Его пример — мысленный опыт. Два шара, связанные верёвкой и удерживаемые на неизменном расстоянии, вращаются вокруг общего центра тяжести в огромном пустом пространстве. По натяжению верёвки мы можем найти их стремление наружу, а отсюда — сколько у них кругового

движения. С формулой $F = mv^2/r$ в руках: если у каждого шара масса 1 килограмм, он находится в 1 метре от центра, а верёвка тянет с силой 4 ньютона, то $v^2 = Fr/m = 4$, так что каждый шар движется со скоростью 2 метра в секунду — и это найдено, не глядя ни на что снаружи.



Два шара на верёвке

Затем одновременно приложите равные силы к одинаковым граням обоих шаров. Если верёвка натянется сильнее, эти силы ускорили шары; если ослабнет — замедлили. Это говорит нам, какие грани при кружении идут позади, а значит, какие впереди, и, следовательно, в какую сторону вращаются шары. Так что и величину, и направление кругового движения можно найти даже в безмерном пустом пространстве, где не с чем сравнить шары.

Теперь добавьте какие-нибудь далёкие тела, всегда сохраняющие одно и то же положение друг относительно друга, как неподвижные звёзды. Наблюдая, как шары движутся на их фоне, мы не могли бы сказать, вращаются ли шары или далёкие тела. Но если натяжение верёвки ровно такое, какого требует движение шаров, мы можем заключить, что движутся шары, а тела покоятся, и тогда по перемещению шаров среди тел найти направление их движения. Гироскоп телефона работает в этом духе: он чувствует собственное истинное вращение по силам внутри микросхемы, не глядя ни на что снаружи, — так ваш экран узнаёт, что вы его повернули, даже в тёмной комнате.

Как собирать истинные движения из их причин, действий и кажущихся разностей и, наоборот, как узнавать причины и действия по движениям, истинным или кажущимся, — это и объясняет остальная книга. Именно для этого, говорит Ньютон, он её и написал. С этими определениями и этим поучением сцена готова: материя, движение и сила измерены, истинное движение отделено от того, что лишь кажется, и могут начаться законы движения.

Запомним

Истинное круговое движение выдаёт себя стремлением наружу, которое растёт как mv^2/r , а у чисто относительного кружения его нет. В ведре Ньютона вода поднимается по стенкам лишь по мере роста её истинного кружения и выше всего — когда покоится относительно ведра, так что истинное вращение — не соотношение с окружающими телами. Повседневные слова вроде «время» и «движение» называют наши меры, и действительные величины нельзя смешивать с этими мерами. Два шара на верёвке показывают, как силы выдают движение: натяжение верёвки даёт величину кружения, дополнительные толчки — его направление, даже когда снаружи не с чем сравнивать. Находить истинные движения по причинам, действиям и видимостям, а причины — по движениям, — вот цель всей книги.

Вопросы

1. По формуле $F = mv^2/r$: что происходит с тягой раскручиваемого мяча, если его скорость удваивается на той же верёвке?
 - a. Она удваивается
 - b. Она остаётся прежней
 - c. Она становится вчетверо больше
 - d. Она уменьшается вдвое

2. Почему, по Ньютону, повседневные слова вроде «время» и «движение» означают, собственно, их меры?
- a. Потому что истинных величин не существует
 - b. Потому что значение слов задаётся их обычным употреблением
 - c. Потому что меры всегда точны
 - d. Потому что так их определяет Писание
3. Два шара на верёвке вращаются в пустом пространстве. Равные толчки по одинаковым граням натягивают верёвку сильнее. Что это говорит нам?
- a. Толчки замедлили шары
 - b. Толчки ускорили шары, значит, эти грани при кружении идут позади
 - c. Шары перестали вращаться
 - d. Ничего, без звёзд для сравнения
4. Как при далёких телах вокруг решить, что движутся шары, а не тела?
- a. Наблюдая, как шары проходят среди тел
 - b. Проверив, что натяжение верёвки ровно такое, какого требует движение шаров
 - c. Взвесив далёкие тела
 - d. Этого никогда нельзя решить

Ответы

1. c) Тяга растёт как квадрат скорости: вдвое большая скорость даёт вчетверо большую тягу, как 4 ньютона при 2 метрах в секунду становятся 16 при 4.

- 2. б)** Если слова значат то, что им придаёт обычное употребление, то под словами «время», «пространство», «место» и «движение» следует понимать их меры.
- 3. б)** Если верёвка натягивается сильнее, эти силы ускорили шары, что говорит, какие грани идут позади, а значит, в какую сторону вращаются шары.
- 4. б)** Если натяжение верёвки ровно такое, какого требует движение шаров, можно заключить, что движутся шары, а тела покоятся.

Разобранные примеры

Скорость шаров по верёвке Два шара массой по 1 килограмму кружат в 1 метре от общего центра, и верёвка тянет каждый с силой 4 ньютона. С какой скоростью движется каждый шар?

Верёвка даёт силу к центру $F = mv^2/r$, которая держит каждый шар на круге.

Выразим скорость: $v^2 = Fr/m = 4 \times 1 / 1 = 4$.

Извлечём квадратный корень: $v = 2$.

Ответ: 2 метра в секунду

Задачи

1. По формуле $F = mv^2/r$: с какой силой тянет мяч массой 1 килограмм на верёвке длиной 1 метр, если его раскручивать со скоростью 3 метра в секунду?

Подсказка: Возведите скорость в квадрат, умножьте на массу и поделите на радиус.

Ответ: 9 ньютонов: $1 \times 3^2 / 1 = 9$.

2. В опыте с шарами верёвка теперь тянет с силой 9 ньютонов каждый шар массой 1 килограмм в 1 метре от центра. С какой скоростью движется каждый шар?

Подсказка: Воспользуйтесь $v^2 = Fr/m$ и извлеките квадратный корень.

Ответ: 3 метра в секунду: $v^2 = 9 \times 1 / 1 = 9$, значит, $v = 3$.

3. Объясните, почему вода в ведре Ньютона поднимается по стенкам лишь тогда, когда истинно вращается.

Подсказка: Сравните плоскую поверхность в начале с лункой в конце.

Ответ: В начале вода быстрее всего движется относительно ведра, но остаётся плоской, значит, у неё нет стремления наружу и она ещё не кружит истинно. По мере роста её собственного истинного кружения растёт и стремление, и она поднимается, выше всего — когда покоится относительно ведра.