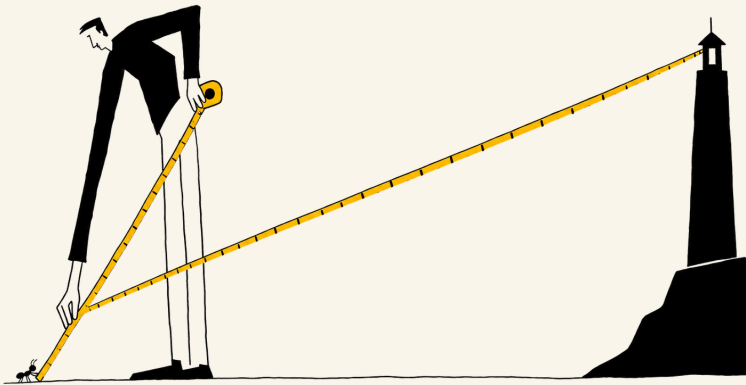


Физика для колледжа



Paul Peter Urone, Roger Hinrichs · 2022

Иллюстрированные аудиолекции

Lecturized

Физика для колледжа

Иллюстрированные аудиолекции

Paul Peter Urone, Roger Hinrichs · 2022

Пересказано в иллюстрированных лекциях Lecturized
lecturized.com

По оригиналу: College Physics 2e, OpenStax (CC BY 4.0 edition, osbooks-college-physics-bundle@f98d7a792138)

Содержание

Физика ближе, чем кажется

Чипсы, аккумулятор и один закон

Скорость, расстояние, время и ваш телефон

От микроволновки к моделям

Законы, предсказания и научный метод

От натуральной философии к классической физике

Очень быстрое, очень малое и зачем нужны единицы

Четыре кирпичика и секунда

Метр и килограмм

Приставки и порядки величины

Размах природы и искусство перевода

Короткая поездка домой

Объём из длины и два вида «хорошо»

Погрешность: честная оговорка

Относительная погрешность

Значащие цифры и загадка нулей

Значащие цифры в вычислениях

Прикидка: какой высоты триллион долларов?

Физика ближе, чем кажется

Что вы чувствуете, когда слышите слово «физика»? Для многих это лёгкий холодок: страницы трудных уравнений, формулы, выученные к экзамену и больше никогда не понадобившиеся. Книга начинает с того, что честно это признаёт, а потом берётся переубедить вас. Её мысль проста: физика играет в вашей жизни гораздо бóльшую роль, чем вы думаете, чем бы вы ни зарабатывали на жизнь.



Как возникла туманность Вуаль

Первое доказательство — фотография неба. На ней туманность Вуаль, огромное облако нагретой пыли и газа, вытянутое в тонкие скрученные верёвки и широкие светящиеся полотнища. Вот как она появилась. Звезда примерно в двадцать раз больше нашего Солнца взорвалась; такой взрыв называют сверхновой. По словам книги, это случилось около восьми тысяч лет назад. Взрыв послал ударную волну, и эта волна до сих пор движется, врезаясь в облака газа и пыли и заставляя их светиться в форме этих верёвок и полотнищ. Сегодня всё облако тянется больше чем на сто десять световых лет.

На этом слове стоит задержаться. Световой год звучит как отрезок времени, но это расстояние: сколько свет проходит за год. Книга называет его величину: около девяти с половиной триллионов километров. Значит, расстояние в световых годах переводится в километры одним умножением: число световых лет умножить на девять с половиной триллионов километров. В символах: $d = n \times 9,5 \times 10^{12}$ км, где d — расстояние, а n — число световых лет. Почему это работает? Каждый световой год — один одинаковый шаг в девять с половиной триллионов километров, так что n шагов в n раз длиннее, точно так же как десять шагов по метру дают десять метров. Теперь посчитаем вслух. Туманность Вуаль находится примерно в двух тысячах четырёхстах световых годах от нас. Две тысячи четыреста, умноженные на девять с половиной триллионов километров, — это около двадцати двух тысяч восьмисот триллионов километров, или $2,3 \times 10^{16}$ км. Спидометр вашей машины через много лет может показывать сто двадцать тысяч километров; чтобы доехать до туманности, такой пробег пришлось бы проехать около двухсот миллиардов раз. И это же число можно прочесть по-другому: свет, который

сегодня доходит до вашего глаза от Вуали, отправился в путь около двух тысяч четырёхсот лет назад.



$$d = n \times 9.5 \times 10^{12} \text{ km}$$

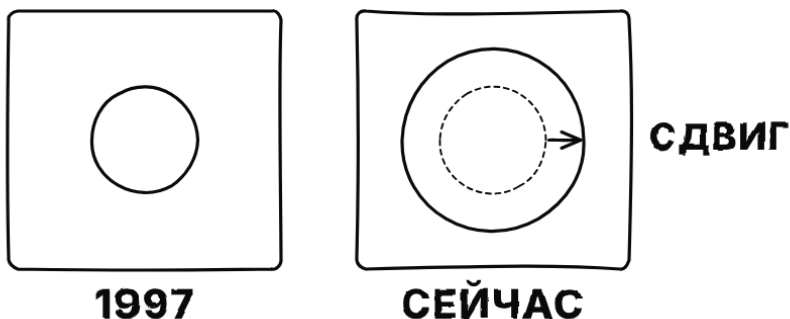
$$n = 2400$$

$$d \approx 2.3 \times 10^{16} \text{ km}$$

Световые годы в километры

Опыт

Сегодня вечером выйдите на улицу и минуту посмотрите на звёзды. Выберите самую яркую, какую видите. Свет, попадающий вам в глаз, покинул эту звезду годы, а может быть, и века назад и всё это время пересекал пространство. Вы видите не звезду такой, какая она сейчас, а такой, какой она была, когда свет отправился в путь.



Два снимка с разницей в годы

Как учёные изучают нечто настолько далёкое? Они наблюдают, как оно меняется. Космический телескоп «Хаббл» сделал подробные снимки Вуали в 1997 году. Новые снимки кладут рядом со старыми, и разница показывает, как далеко прошла ударная волна и как расползлось облако. Это как сравнить в телефоне две фотографии одного и того же места, снятые с разницей в годы: что сдвинулось, то и говорит, что произошло в промежутке.

А теперь главное, ради чего показана вся эта картина. Силы, которые заставляют этот остаток сверхновой вести себя так, как он себя ведёт, — те же силы, с которыми мы имеем дело здесь, на Земле. Инженеры встречаются с ними, когда планируют

отправить ракету в космос, и тогда, когда просто рассчитывают отопление нового дома. Масштаб совершенно иной, но газы в Вуали давят и перемешиваются почти так же, как газы на Земле. Даже цвета знакомые: это свечение водорода, серы, кислорода и подобных элементов — тех самых, из которых состоит всё вокруг нас. Словами книги, «силы там, наверху, те же, что и здесь, на Земле». Иначе говоря, нет отдельной физики для неба: одни и те же правила действуют и для звёзд, и для вашей кухни.

Второе доказательство — история наших инструментов. Мы называем эпохи истории по материалам: каменный век, бронзовый век, железный век. Каждая эпоха была отмечена знанием физических свойств какого-то материала и умением его обрабатывать. Это знание и есть физика, будь то то, как раскалывается камень от удара, когда делают наконечник копья, как углерод, введённый в железо в печах Южной Индии и Шри-Ланки, дал самую раннюю высококачественную сталь, или как шлифовать и полировать стекло и собирать из него оптические приборы.



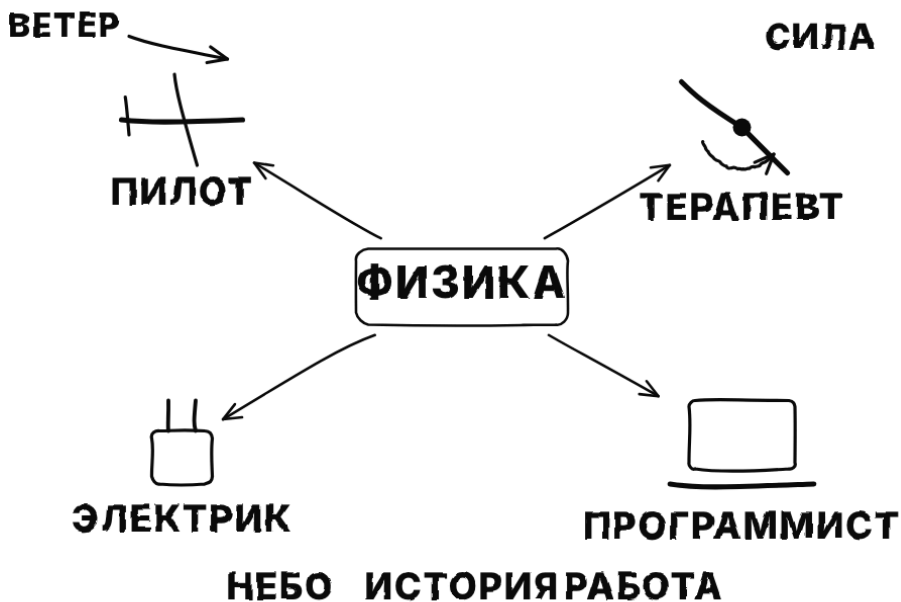
Эпохи по названиям материалов

Наша собственная эпоха, информационная, опирается на всё это, и особенно на одно маленькое изобретение. В 1959 году в лаборатории в Нью-Джерси Мохамед Аталла, родившийся в Египте, и Давон Канг, родившийся в Корее, изобрели MOSFET, полевой транзистор со структурой металл — оксид — полупроводник: крошечный электрический переключатель. Почти никто о нём не слышал, а между тем таких транзисторов сделано больше, чем любых других предметов за всю историю человечества. В телефоне у вас в кармане их миллиарды, как и в микросхемах, управляющих вашей машиной, и в микроволновке на кухне. Книга использует эту историю, чтобы сделать ещё одно замечание: великие изобретения нашего времени появились

благодаря людям самого разного происхождения, работавшим вместе.

Третье доказательство — работа людей. Поезда, парящие над рельсами, плащи, огибающие свет вокруг себя, и крошечные роботы, сражающиеся с раковыми клетками, — всё это опирается на принципы физики. Но и обычные профессии тоже.

Инженеры, пилоты, врачи, физиотерапевты, электрики и программисты пользуются физикой каждый день. Пилот должен понимать, как силы ветра сбивают самолёт с курса; физиотерапевт должен понимать силы, которые испытывают мышцы, когда тело движется и сгибается. Даже доза на этикетке лекарства опирается на тщательное измерение, а именно к нему и ведёт эта глава.



Профессии, где нужна физика

Итак, книга доказывает своё трижды: небом, историей и повседневной работой. Физика — это не набор формул, оторванных от жизни; она описывает мир, в котором вы уже живёте.

Запомним

Туманность Вуаль — светящиеся остатки взорвавшейся звезды, и её ударная волна всё ещё расходится сквозь газ и пыль. Световой год — это расстояние, около девяти с половиной триллионов километров, так что две тысячи четырёхсот световых лет до туманности — это около двух целых трёх десятых на десять в шестнадцатой степени километров. Силы, которые формируют это облако, те же, что и на Земле, — в ракетах и в отоплении дома. Каждая технологическая эпоха, от каменных орудий до транзисторов в вашем телефоне, держалась на знании того, как ведут себя материалы. Многие профессии, от пилота до физиотерапевта, пользуются физикой каждый день.

Вопросы

1. Почему в формуле $d = n \times 9,5 \times 10^{12}$ км число световых лет умножают, а не складывают?
 - a. Потому что на больших расстояниях свет разгоняется
 - b. Потому что каждый световой год — одинаковый шаг одной и той же длины, и n одинаковых шагов дают в n раз большую длину
 - c. Потому что световые годы и километры — одна и та же единица
 - d. Потому что формула даёт время, а не расстояние

2. Свет от туманности Вуаль, находящейся в 2400 световых годах, сегодня доходит до вашего глаза. О чём это говорит?
- a. Свет отправился в путь около 2400 лет назад
 - b. Туманности 2400 лет
 - c. Свет шёл один год
 - d. Туманность взорвалась 2400 лет назад
3. Что показывают цвета на фотографии туманности Вуаль?
- a. Краску, добавленную для красоты снимка
 - b. Элементы, которые встречаются только в далёком космосе
 - c. Свечение водорода, серы, кислорода и подобных знакомых элементов
 - d. Жар исходной звезды, которая всё ещё горит
4. Почему лекция называет историю орудий доказательством в пользу физики?
- a. Потому что древние кузнецы записывали физические законы
 - b. Потому что орудия всегда изобретали физики
 - c. Потому что камень, бронза и железо — физические постоянные
 - d. Потому что каждая эпоха держалась на знании того, как ведёт себя материал и как его обрабатывать

Ответы

1. b) Каждый световой год — один одинаковый шаг в девять с половиной триллионов километров, так что n шагов в n раз длиннее.

2. а) Световой год — это путь света за год, поэтому свет с расстояния 2400 световых лет был в пути около 2400 лет.

3. с) Цвета — это свечение знакомых элементов, тех же, из которых состоит всё вокруг нас.

4. d) Каждая эпоха была отмечена знанием физических свойств какого-то материала и умением его обрабатывать, а это знание и есть физика.

Разобранные примеры

От световых лет к километрам Туманность Вуаль находится примерно в 2400 световых годах от Земли, а один световой год — около $9,5 \times 10^{12}$ км. Каково это расстояние в километрах?

Воспользуемся формулой $d = n \times 9,5 \times 10^{12}$ км, потому что каждый световой год — одинаковый шаг в $9,5 \times 10^{12}$ км.

Здесь $n = 2400$, значит, $d = 2400 \times 9,5 \times 10^{12}$ км.

Сначала перемножим обычные числа: $2400 \times 9,5 = 22\,800$.

Значит, $d = 22\,800 \times 10^{12}$ км, то есть $2,28 \times 10^{16}$ км, примерно $2,3 \times 10^{16}$ км.

Ответ: около $2,3 \times 10^{16}$ км

Задачи

1. Туманность Вуаль простирается примерно на 110 световых лет. Пользуясь формулой $d = n \times 9,5 \times 10^{12}$ км, найдите её ширину в километрах.

Подсказка: Подставьте $n = 110$ и сначала перемножьте обычные числа.

Ответ: Около $1,0 \times 10^{15}$ км: $110 \times 9,5 = 1045$, значит, $d = 1045 \times 10^{12}$ км $\approx 1,0 \times 10^{15}$ км.

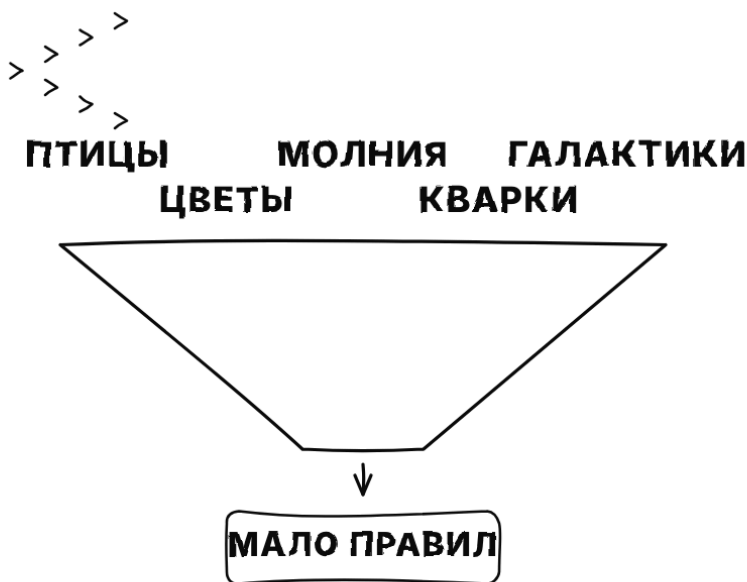
2. Объясните своими словами, почему физика нужна и пилоту, и физиотерапевту.

Подсказка: Назовите силы, которые должен понимать каждый из них.

Ответ: Пилот должен понимать, как силы ветра сбивают самолёт с курса, а физиотерапевт — какие силы испытывают мышцы, когда тело движется и сгибается. Оба работают с силами, поэтому обоим нужна одна и та же физика.

Чипсы, аккумулятор и один закон

Посмотрите на стаю гусей, летящую осенью на юг: аккуратный клин через всё небо. Книга показывает такую картинку и спокойно говорит, что этот строй подчиняется законам физики. Это смелое утверждение, и начало главы объясняет, почему его можно сделать.

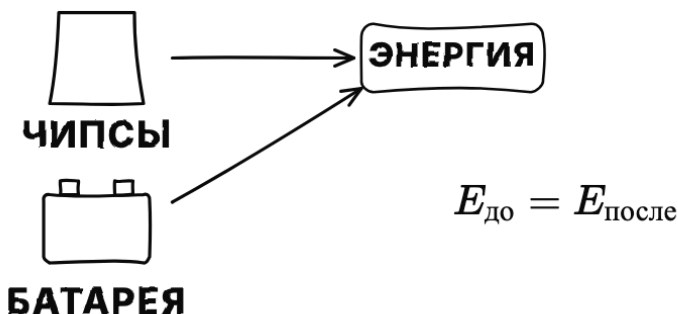


Много фактов, мало законов

Мир невероятно сложен в своих подробностях. Каждый день мы видим огромное разнообразие вещей, и за века люди собрали громадный запас фактов: о полёте птиц и окраске цветов, о

молнии и тяготении, о крошечных частицах, называемых кварками, и о громадных скоплениях галактик, о течении времени и о тайне того, как возникла Вселенная. Перед лицом всех этих подробностей люди обнаружили неожиданное: удивительно небольшой и единый набор физических законов объясняет то, что мы наблюдаем. Мы ищем порядок, и природа, по словам книги, «на редкость сговорчива».

Вот собственный пример книги. Что общего у пакета чипсов и автомобильного аккумулятора? В обоих есть энергия, которую можно превратить в другие формы. Закон, который их связывает, называется законом сохранения энергии: энергия может менять форму, но никогда не теряется. В виде формулы: $E_{\text{до}} = E_{\text{после}}$, где E — полная энергия, подсчитанная сразу во всех её формах. Словами: какие бы формы ни принимала энергия, сложите их все до изменения и после него, и две суммы окажутся равны. Откуда эта мысль, если идти от интуиции? Представьте деньги, которые перекладывают из кармана в карман: монеты могут переходить из одного кармана в другой, но если ни одна не ушла от вас, общая сумма остаётся той же. Допустим, аккумулятор вашего телефона отдаёт сто единиц энергии, пока вы смотрите фильм; возможно, восемьдесят из них превращаются в свет и звук, а двадцать — в тепло, которое вы чувствуете на задней крышке телефона. Восемьдесят плюс двадцать — сто, та же сумма, что и раньше; ничего не исчезло, всё лишь сменило форму.



$$80 + 20 = 100$$

Энергия не теряется

Один закон — и он связывает калории пищи, батарейки, теплоту, свет и заведённую пружину часов. Понимание этого закона облегчает каждую из этих тем, потому что вы видите, как формы энергии связаны друг с другом. Иначе говоря, темы, которые кажутся не связанными, соединены законами, которые действуют очень широко, и это позволяет понимать, а не заучивать списки фактов.

Эти две мысли — что немногие законы объединяют всё и что природа в своей основе проста — проходят через всю книгу. Учась применять законы, вы, конечно, познакомитесь с главными разделами физики. Но книга подчёркивает нечто более важное: навыки анализа, которые позволяют пользоваться

этими законами далеко за пределами того, что может вместить одна книга. Эти навыки помогают в учёбе и помогают мыслить критически, какую бы профессию вы ни выбрали.

Затем книга намечает дальнейший путь. Она проследит историю внимательного изучения природы, начиная с натуральной философии и древних мыслителей Ближнего Востока и Средиземноморья и вплоть до сэра Исаака Ньютона и законов, носящих его имя. Она познакомит с эталонами, которыми учёные измеряют физические величины, — общей системой измерений, которая позволяет учёным всего мира говорить на одном математическом языке. Это то самое соглашение, благодаря которому кухонные весы в одной стране и доза лекарства, напечатанная в другой, означают ровно одни и те же граммы. И она рассмотрит пределы измерения: насколько правильными и насколько точными мы можем быть и почему учёные так стараются ясно сказать, чего они знать не могут. Наконец, этот первый раздел обещает три вещи: сказать, что такое физика, показать, как она служит другим областям, и объяснить, что на самом деле представляет собой физический закон и почему опыт так важен для теории.

Запомним

Небольшой единый набор законов объясняет невероятно разнообразный мир, а природа в глубине оказывается упорядоченной и простой. Закон сохранения энергии говорит, что полная энергия до изменения равна полной энергии после него: энергия меняет форму, но никогда не теряется. Этот один закон связывает пищу, батарейки, теплоту, свет и пружины, так что понимание заменяет заучивание. Впереди — история физики, общие эталоны измерений и честные пределы того, насколько точно мы умеем измерять.

Вопросы

1. Что утверждает формула $E_{\text{до}} = E_{\text{после}}$?
 - a. При каждом изменении создаётся энергия
 - b. Полная энергия, подсчитанная во всех её формах, одинакова до и после изменения
 - c. Энергия до изменения всегда больше
 - d. Сохраняется только тепловая энергия
2. Аккумулятор телефона отдаёт 100 единиц энергии; 80 превращаются в свет и звук. Где остальные 20?
 - a. Они уничтожаются
 - b. Они возвращаются в аккумулятор
 - c. Они становятся теплом в телефоне

- d. Их никогда не было
3. Почему лекция сравнивает энергию с монетами, которые перекладывают из кармана в карман?
- a. Потому что монеты могут переходить из кармана в карман, а сумма остаётся прежней, если ни одна не ушла
 - b. Потому что энергия стоит денег
 - c. Потому что и монеты, и энергия сделаны из металла
 - d. Потому что энергия теряется, как потраченные монеты
4. Что книга считает более важным, чем изучение главных разделов физики?
- a. Заучивание значений постоянных
 - b. Запоминание имён знаменитых физиков
 - c. Чтение как можно большего числа применений
 - d. Навыки анализа, позволяющие применять законы далеко за пределами одной книги

Ответы

1. b) Какие бы формы ни принимала энергия, суммы до и после изменения равны: энергия меняет форму, но никогда не теряется.
2. c) Восемьдесят плюс двадцать — сто: остальное становится теплом, так что сумма не меняется.
3. a) Энергия переходит из формы в форму, как монеты из кармана в карман; сумма остаётся той же.
4. d) Книга подчёркивает навыки анализа, которые позволяют пользоваться законами далеко за пределами того, что может вместить одна книга.

Разобранные примеры

Прослеживаем энергию через изменение Аккумулятор отдаёт 100 единиц энергии; 80 единиц становятся светом и звуком. Пользуясь равенством $E_{\text{до}} = E_{\text{после}}$, найдите, сколько становится теплом.

Энергия сохраняется, значит, сумма после должна быть равна 100 единицам до.

Запишем: $100 = 80 + \text{тепло}$.

Вычтем: $\text{тепло} = 100 - 80 = 20$.

Ответ: 20 единиц

Задачи

1. Лампа получает каждую секунду 60 единиц энергии и отдаёт 6 единиц в виде света. Если энергия не теряется, сколько уходит теплом каждую секунду?

Подсказка: Сумма после должна быть равна сумме до: $60 = \text{свет} + \text{тепло}$.

Ответ: 54 единицы: $60 - 6 = 54$, потому что энергия меняет форму, а её сумма остаётся равной 60.

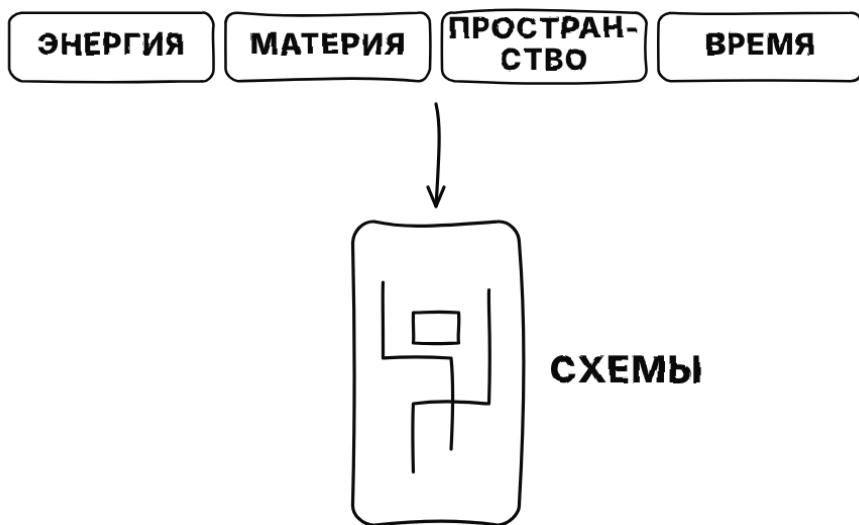
2. Объясните своими словами, почему книга называет природу «на редкость сговорчивой».

Подсказка: Сравните число фактов с числом законов.

Ответ: Мы собрали огромное число фактов о мире, и всё же их объясняет удивительно небольшой и единый набор законов. В природе есть глубинный порядок и простота — именно то, на что мы надеемся, когда ищем обобщения.

Скорость, расстояние, время и ваш телефон

Откройте карту в телефоне и попросите маршрут через весь город. Через секунду она сообщит расстояние и сколько займёт поездка. Откуда это может знать маленькая стеклянная пластинка у вас в руке? Ответ начинается с того, что такое физика, и с одного из её самых простых соотношений.



Что описывает физика

Сначала определение из книги. Наука состоит из теорий и законов — общих истин о природе — вместе со всем знанием,

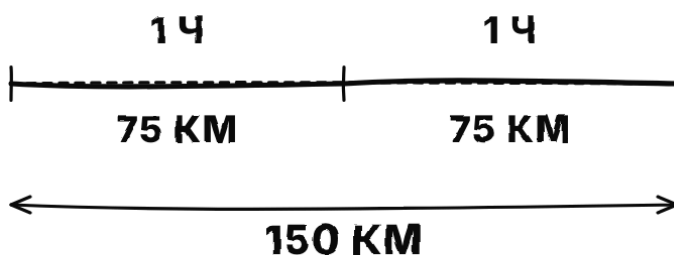
которое они в себе содержат; учёные постоянно пополняют это знание и всё точнее формулируют законы. Физика — часть науки, которая описывает, как энергия, материя, пространство и время действуют друг на друга. Прежде всего она спрашивает, какой основной механизм лежит под каждым событием. Именно этот интерес к самым основным механизмам природы и отличает физику от других наук. Её охват простирается от движения крошечных заряженных частиц до движения людей, машин и космических кораблей, и почти всё вокруг вас её законы описывают довольно точно.

Возьмём сам телефон. Внутри телефона электричество течёт по множеству маленьких схем, и физика точно описывает, как это происходит. Инженеры пользуются этим знанием, чтобы выбрать материалы и расположить схемы, когда собирают телефон.

Теперь карта. Физика описывает, как связаны скорость тела, пройденное им расстояние и затраченное время. В символах: $d = vt$. Здесь d — пройденное расстояние, v — скорость, t — время; vt означает v , умноженное на t . Словами: расстояние равно скорости, умноженной на время. Откуда это берётся? При постоянной скорости каждый час добавляет один и тот же отрезок дороги, так что через два часа у вас два таких отрезка, через три — три; отрезки просто складываются, а сложить равные части — значит умножить. Допустим, спидометр вашей машины два часа показывает семьдесят пять километров в час: $d = 75 \text{ км/ч} \times 2 \text{ ч} = 150 \text{ км}$. Заметьте, что часы сокращаются и остаются километры, как и должно быть у расстояния. То же соотношение, перевернутое, даёт время: $t = d/v$. Поездка в сто пятьдесят километров со скоростью семьдесят пять километров в час

занимает сто пятьдесят, делённые на семьдесят пять, то есть два часа; именно это действие выполняет карта, когда оценивает время в пути.

$$d = v t$$



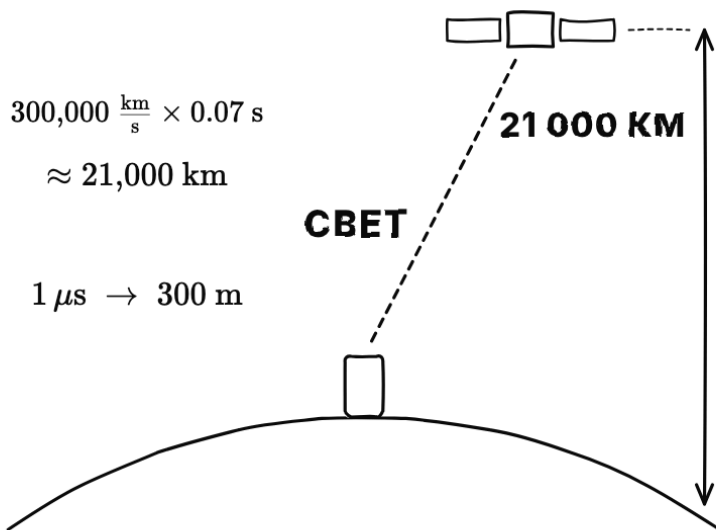
$$\frac{150}{75} = 2 \text{ h}$$

$$t = \frac{d}{v}$$

Расстояние — это скорость на время

Навигационная система, на которой работает карта, — GPS — пользуется тем же соотношением с гораздо большим размахом. Ей приходится учитывать форму земной поверхности, точные расстояния до спутников, кружащих высоко над нами, и даже тонкий эффект, называемый замедлением времени: часы, которые быстро движутся или находятся в более слабом тяготении, идут с немного разной скоростью. Ваш приёмник находит расстояние до каждого спутника по тому, сколько времени идёт сигнал спутника, а сигнал распространяется со

скоростью света — около трёхсот тысяч километров в секунду. Так что снова $d = vt$: сигнал, который идёт семь сотых секунды, проходит около трёхсот тысяч, умноженных на семь сотых, то есть примерно двадцать одну тысячу километров, — примерно на такой высоте и летают эти спутники. Поскольку свет так быстр, ошибка часов всего на миллионную долю секунды сдвинула бы ответ на триста метров, вот почему со временем нужно обращаться так бережно. Большинство этих расчётов опирается на методы, разработанные Глэдис Уэст, математиком и специалистом по информатике, которая программировала первые компьютеры, способные очень точно определять положение на расстоянии. Когда синяя точка на карте в вашем телефоне показывает, где вы стоите, её ставят туда методы Уэст и соотношение между расстоянием, скоростью и временем.



Сигнал спутника на ваш телефон

Затем книга расширяет взгляд. Чтобы пользоваться физикой, не нужно быть учёным: она объясняет, как микроволновка нагревает еду и почему металлу в ней не место, и почему белая крыша сохраняет в доме прохладу. Она и основа других наук: химия опирается на физику атомов и молекул, бóльшая часть техники — прикладная физика, а медицина использует её в рентгене, томографах и лучевой терапии.

Но вот мысль, которую книга хочет, чтобы вы запомнили. Не нужно изучать каждое из этих применений. Важнее всего знать основные законы и уметь их применять. Соотношение $d = vt$ — хороший пример: один короткий закон одинаково служит и поездке на машине, и приложению с картой, и сигналу спутника.

Иначе говоря, выучите закон и метод, а применения придут сами. Книга добавляет, что такое изучение оттачивает умение решать задачи, а поскольку физика хранит самые основы науки, она облегчает изучение любой другой науки.

Запомним

Физика описывает, как энергия, материя, пространство и время действуют друг на друга, и ищет основной механизм под каждым событием. Расстояние равно скорости, умноженной на время, $d = vt$, так что за два часа при семидесяти пяти километрах в час проезжаешь сто пятьдесят километров. В перевернутом виде $t = d/v$ даёт время в пути — так карта и оценивает поездку. Спутниковая навигация пользуется тем же соотношением с сигналами, идущими со скоростью света, поэтому крошечные ошибки во времени очень важны. Важнее всего не список применений, а основные законы и умение их применять.

Вопросы

1. Чем, по словам лекции, физика отличается от других наук?
 - a. Она пользуется математикой больше любой другой науки
 - b. Она изучает только очень большие объекты
 - c. Она описывает, как энергия, материя, пространство и время действуют друг на друга, и ищет основной

механизм под каждым событием

- d. Она занимается только электричеством
2. Что произойдёт с расстоянием в формуле $d = vt$, если ехать с той же скоростью вдвое дольше?
- a. Оно станет вдвое больше
 - b. Оно останется прежним
 - c. Оно станет вдвое меньше
 - d. Оно станет в девять раз больше
3. Почему крошечная ошибка часов так важна в спутниковой навигации?
- a. Потому что спутники движутся медленно
 - b. Потому что сигналы идут со скоростью света, и миллионная доля секунды сдвигает расстояние примерно на триста метров
 - c. Потому что поверхность Земли плоская
 - d. Потому что часы на спутниках никогда не идут иначе
4. Какой вывод делает лекция из того, что соотношение $d = vt$ служит и поездке на машине, и карте, и сигналу спутника?
- a. Что каждому применению нужен свой закон
 - b. Что карты точнее спидометров
 - c. Что GPS не нуждается в физике
 - d. Что знать основной закон и уметь его применять важнее, чем заучивать применения

Ответы

1. **с)** Физика описывает, как энергия, материя, пространство и время действуют друг на друга, и её отличает интерес к самым основным механизмам природы.
2. **а)** При постоянной скорости каждый час добавляет один и тот же отрезок, так что втрое большее время даёт втрое большее расстояние.
3. **б)** Свет проходит около трёхсот тысяч километров в секунду, так что даже миллионная доля секунды означает около трёхсот метров.
4. **д)** Один короткий закон служит многим целям; выучите закон и метод, и применения последуют.

Разобранные примеры

Расстояние и время в поездке на машине Спидометр два часа показывает 75 км/ч. Сколько вы проедете? И сколько займёт поездка в 150 км с этой скоростью?

Воспользуемся формулой $d = vt$: расстояние равно скорости, умноженной на время.

$$d = 75 \text{ км/ч} \times 2 \text{ ч} = 150 \text{ км}; \text{ часы сокращаются, остаются километры.}$$

Для времени перевернём соотношение: $t = d/v$.

$$t = 150 \text{ км} \div 75 \text{ км/ч} = 2 \text{ ч.}$$

Ответ: 150 км и 2 ч

Задачи

1. Вы проезжаете 210 км с постоянной скоростью 70 км/ч. Сколько длится поездка?

Подсказка: Воспользуйтесь формулой $t = d/v$.

Ответ: 3 ч: $t = 210 \text{ км} \div 70 \text{ км/ч} = 3 \text{ ч.}$

2. Сигнал проходит около 300 000 км в секунду. Какое расстояние он пройдёт за 0,05 с?

Подсказка: Воспользуйтесь формулой $d = vt$, где $v = 300\,000$ км/с и $t = 0,05$ с.

Ответ: Около 15 000 км: $300\,000 \times 0,05 = 15\,000$, а секунды сокращаются, остаются километры.

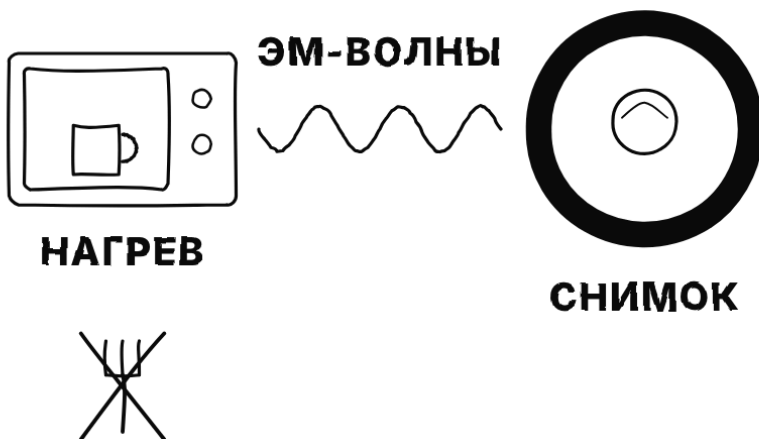
3. Поездка в 120 км занимает 1,5 ч. Какова была средняя скорость?

Подсказка: Выразите v из формулы $d = vt$.

Ответ: 80 км/ч: $v = d/t = 120 \text{ км} \div 1,5 \text{ ч} = 80 \text{ км/ч}$.

От микроволновки к моделям

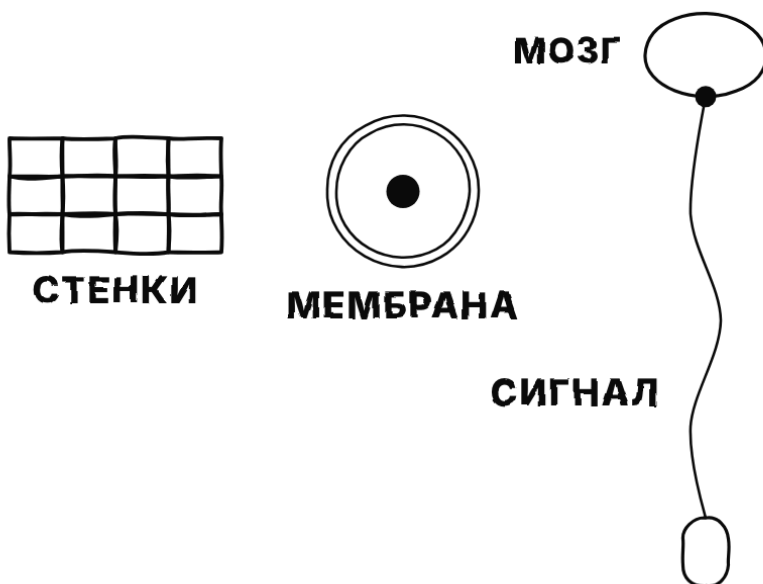
Поставьте чашку остывшего кофе в микроволновку, нажмите «пуск» и подождите минуту. Чашка выходит тёплой, но стенки печи остаются холодными, и внутри ничего не раскалялось, как на плите. А теперь представьте нечто совсем другое: пациент въезжает в тоннель больничного томографа, и тот выдаёт чёткое изображение мозга. Что вообще может быть общего у кухонного прибора и больничного томографа?



Одни волны, две машины

Книга отвечает парой картинок. Обе машины используют электромагнитные волны — то же семейство волн, к которому принадлежат свет и радио. Микроволновая печь с их помощью нагревает пищу. Томограф, называемый магнитно-резонансным, или МРТ, строит с их помощью изображение мозга, настолько подробное, что видно, где именно находится опухоль. Иначе говоря, один и тот же кусок физики служит и ужину, и диагнозу. Те же законы объясняют, почему металлические предметы никогда нельзя ставить в микроволновку, — поэтому книга и называет законы физики ключом к обычным бытовым приборам.

Физика проникает и в живое. Посмотрите на тонкую плёнку луковой кожицы под микроскопом, и вы увидите аккуратные ряды ячеек: стенки растительных клеток. Физика вместе с химией и биологией помогает описать, как ведут себя эти стенки. У животных клеток нет жёстких стенок; вместо этого каждая окружена тонкой сложной мембраной, которая обозначает её границу. От таких мембран зависят многие самые основные свойства жизни, среди них срабатывание нервных клеток, которое переносит каждый сигнал от кончиков пальцев к мозгу. Чтобы их понять, нужны вместе биология, химия и физика. Вибрация телефона, когда приходит сообщение, — та, что вы чувствуете пальцами, — идёт к мозгу как раз по таким нервным клеткам.



Клеточные стенки и мембраны

До сих пор мы видели, что объясняет физика. Теперь книга переходит к тому, как она объясняет: что такое законы, модели и теории и почему над всеми ними властвует эксперимент.

Начнём с законов природы. Книга называет их краткими описаниями Вселенной: человеческими формулировками глубинных правил, которым следует каждый природный процесс. Сами правила принадлежат Вселенной. Люди их не создавали и не могут изменить; мы можем лишь открывать и понимать их. А открытие — очень человеческое дело, полное тайны, воображения, борьбы, торжества и разочарования, как любой творческий труд.

Два портрета в книге делают эту человеческую сторону живой. Исаак Ньютон так не хотел публиковать свою революционную работу, что другим пришлось его уговаривать. В поздние годы он возглавил Королевский монетный двор и отнёсся к должности настолько серьёзно, что ввёл рубчики по краю монет, чтобы мошенники больше не могли срезать с них серебро, прежде чем пустить их в ход. Мария Кюри платила за свои первые исследования из собственного кармана и подорвала здоровье из-за облучения; она единственный человек, получивший Нобелевские премии и по физике, и по химии, а одна из её дочерей тоже стала нобелевским лауреатом.

Какой бы ни была борьба, всё дело держится на одном: на наблюдении. Словами книги, наука должна описывать Вселенную «такой, какая она есть, а не такой, какой мы можем её себе вообразить».

Опыт

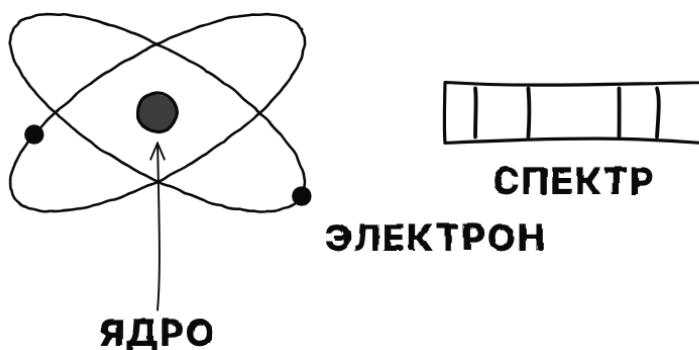
В течение недели каждое утро поглядывайте на небо и записывайте, какие облака видите. Затем отмечайте, был ли в тот день дождь. В конце недели поищите закономерность: шли ли определённые облака перед дождём? Вы только что сделали то, что книга называет первым, неформальным шагом науки: смотреть, обобщать и пытаться понять.

Так начинаем все мы. Когда мы берёмся всерьёз, говорит книга, мы становимся организованнее: строго собираем и анализируем данные, стремимся к большей точности, ставим контролируемые опыты, где это возможно, и записываем, как данные могли бы

складываться в одно целое. Затем мы строим модели, теории и законы, чтобы подытожить результаты и поделиться ими с другими.

Сначала модель. Модель — это представление чего-то слишком трудного или невозможного для непосредственного показа. Пример из книги — планетарная модель атома: электроны представляются вращающимися вокруг ядра так, как планеты обращаются вокруг Солнца. Никто не может увидеть орбиту электрона, но эта картинка помогает объяснить то, что мы наблюдать можем, например особые цвета света, которые испускают нагретые газы, — их называют атомными спектрами. Вот важнейшее ограничение: модель подтверждается опытом, но точна лишь в ограниченных условиях. Хорошее сравнение — карта в вашем телефоне: упрощённая картинка, отличная, чтобы найти улицу, но ничего не говорящая о высоте зданий. Физики используют модели, чтобы проанализировать ситуацию и выполнить расчёт или представить её в виде компьютерной симуляции.

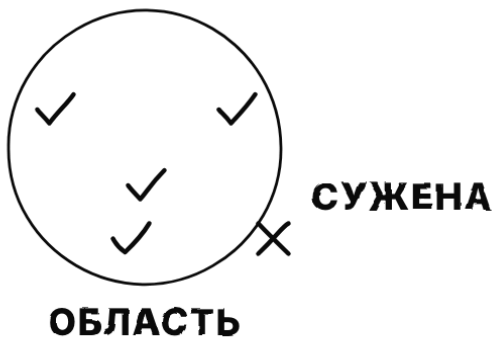
МОДЕЛЬ ОГРАНИЧЕНА



Планетарная модель атома

Далее теория. В обычной речи теория — это догадка, идея, самое большее гипотеза, и люди отмахиваются: «это всего лишь теория». Для учёных эта фраза звучит бессмысленно, потому что сама наука построена на теориях. Научная теория — это проверяемое объяснение закономерностей природы, подкреплённое данными и много раз подтверждённое разными группами исследователей. Одни теории пользуются моделями, другие нет; теория тяготения Ньютона не нуждается в мысленной картинке, потому что падающие и обращающиеся тела, которые она описывает, видны непосредственно.

ТЕОРИЯ



РЕШАЕТ ОПЫТ

Теорию проверяют в её области

Разница между моделью и теорией — в их охвате. Модель призвана точно описывать лишь некоторые стороны системы. Теория должна описывать все стороны любой системы, попадающей в её область применимости, — круг случаев, на которые она претендует. Эта претензия — обещание, которое можно проверить: каждое следствие теории, которое можно проверить на опыте, должно подтверждаться. И если эксперимент когда-нибудь покажет, что одно из следствий ложно, теорию либо отбрасывают, либо подправляют, например сужая её область. Иначе говоря, границы каждой модели и каждой теории проводит эксперимент.

Запомним

Микроволновые печи и томографы МРТ используют электромагнитные волны: одни — чтобы греть еду, другие — чтобы получать изображение мозга. Физика вместе с химией и биологией объясняет клеточные стенки и мембраны, от которых зависят нервные сигналы. Законы природы принадлежат Вселенной; мы их лишь открываем, а опорой науки служит наблюдение мира таким, какой он есть. Модель — картинка того, что нельзя показать непосредственно, как планетарный атом, и она точна лишь в ограниченных условиях. Научная теория — хорошо проверенное объяснение, которое должно охватывать всё в своей области и меняться или отбрасываться, если эксперимент ей противоречит.

Вопросы

1. Что, по словам лекции, общего у микроволновой печи и томографа МРТ?
 - a. Оба используют электромагнитные волны
 - b. Оба нагревают пищу
 - c. Оба работают только с металлом
 - d. Оба используют радиоактивные вещества
2. Почему планетарную картину атома называют моделью, а не описанием того, что мы видим?

- a. Потому что её нарисовал художник
 - b. Потому что она доказана верной во всех случаях
 - c. Потому что орбиты электронов нельзя наблюдать, хотя картинка объясняет то, что наблюдать можно
 - d. Потому что атомы и правда крошечные солнечные системы
3. Что происходит с теорией, если эксперимент показывает, что одно из её следствий ложно?
- a. Она становится моделью
 - b. Её отбрасывают или подправляют, например сужая её область
 - c. Ничего, ведь теории — всего лишь догадки
 - d. Её оставляют, потому что её уже проверяли раньше
4. Чем охват теории отличается от охвата модели?
- a. Модель охватывает всё, а теория лишь некоторые стороны
 - b. Обе охватывают ровно одни и те же случаи
 - c. Ни ту, ни другую нельзя проверить экспериментом
 - d. Модель описывает лишь некоторые стороны, а теория должна описывать все стороны любой системы в своей области

Ответы

1. **a)** Микроволновка с помощью электромагнитных волн греет пищу, а томограф МРТ с их помощью получает изображение мозга.
2. **c)** Никто не может увидеть орбиту электрона, но картинка помогает объяснить наблюдения, например атомные спектры.

- 3. b)** Каждое проверяемое следствие должно подтверждаться; если одно не подтверждается, теорию отбрасывают или сужают её область.
- 4. d)** Модель призвана точно описывать некоторые стороны, а теория должна охватывать все стороны в своей области применимости.

Задачи

- 1.** Кто-то говорит, что эволюция — «всего лишь теория». Пользуясь лекцией, объясните, почему учёному это замечание кажется бессмысленным.

Подсказка: Сравните бытовое значение слова «теория» с научным.

Ответ: В обычной речи теория — это догадка, но для учёных теория — проверяемое объяснение закономерностей природы, подкреплённое данными и много раз подтверждённое разными исследователями. Наука построена на теориях, поэтому называть что-то «всего лишь теорией» — значит не понимать этого слова.

- 2.** Почему теории тяготения Ньютона не нужна модель, а планетарный атом — модель? Объясните своими словами.

Подсказка: Спросите себя, можно ли увидеть соответствующие объекты непосредственно.

Ответ: Падающие и обращающиеся тела в теории Ньютона можно наблюдать непосредственно органами чувств, поэтому мысленная картинка не нужна. Электроны в атоме увидеть нельзя, поэтому мы пользуемся картинкой — планетарной моделью, — чтобы объяснить то, что наблюдать можем.

- 3.** В лекции сказано, что краеугольный камень открытия законов — наблюдение. Что это значит для изящной идеи, которая расходится с тщательными наблюдениями?

Подсказка: Вспомните, что должна описывать наука.

Ответ: Наука должна описывать Вселенную такой, какая она есть, а не такой, какой мы её воображаем, поэтому идея должна уступить: если тщательное наблюдение ей противоречит, она неверна или должна быть изменена, как бы изящна она ни была.

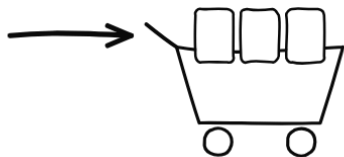
Законы, предсказания и научный метод

Толкните пустую тележку из супермаркета по парковке, и она легко покатится. Теперь нагрузите её тяжёлыми сумками и толкните так же: она набирает скорость гораздо медленнее. Чтобы полная тележка разгонялась так же быстро, как пустая, толкать нужно сильнее. Это бытовое ощущение выражено одним из самых знаменитых законов физики, и на нём удобно увидеть, чем закон отличается от теории.

ТОЛЧОК



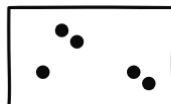
БЫСТРО



МЕДЛ.



МОДЕЛЬ ГАЗА



Тот же толчок, разный груз

Сначала несколько слов о картинках. Одни теории приходят с моделью — мысленным образом того, что нельзя увидеть; другим она не нужна. Теории тяготения Ньютона модель не нужна, потому что падающие и обращающиеся тела, которые она описывает, видны непосредственно. Молекулярно-кинетическая теория газов, напротив, представляет газ состоящим из атомов и молекул, слишком малых для наших органов чувств, и мы их воображаем, чтобы понять, что приборы сообщают нам о поведении газов.

Теперь закон. Закон кратко описывает общую закономерность природы, подкреплённую данными и повторными опытами, и часто его можно записать одним уравнением. Пример из книги — второй закон движения Ньютона: $F = ma$. Здесь F — сила, то есть толчок или тяга, измеряемая в ньютонах; m — масса, в килограммах; a — ускорение, то есть как быстро меняется скорость, в метрах в секунду, прибавляемых каждую секунду. Словами: нужная сила равна массе, умноженной на ускорение. Откуда это, если идти от интуиции? Двойная масса — это как две тележки бок о бок, и каждой нужен свой толчок, так что сила удваивается; а чтобы разогнать ту же тележку вдвое быстрее, толкать нужно вдвое сильнее. Теперь посчитаем вслух. Тележке массой двадцать килограммов, которая каждую секунду прибавляет два метра в секунду скорости, нужна сила $F = 20 \text{ кг} \times 2 \text{ м/с}^2 = 40 \text{ Н}$. Нагрузите её до сорока килограммов и сохраните то же ускорение — сила удвоится до восьмидесяти ньютонов. Другой закон, который называет книга, — закон сохранения энергии: в любом процессе энергия сохраняется.

$$F = m a$$

$$\text{N} \qquad \text{kg} \qquad \text{m/s}^2$$



$$20 \text{ kg} \times 2 \text{ m/s}^2 = 40 \text{ N}$$



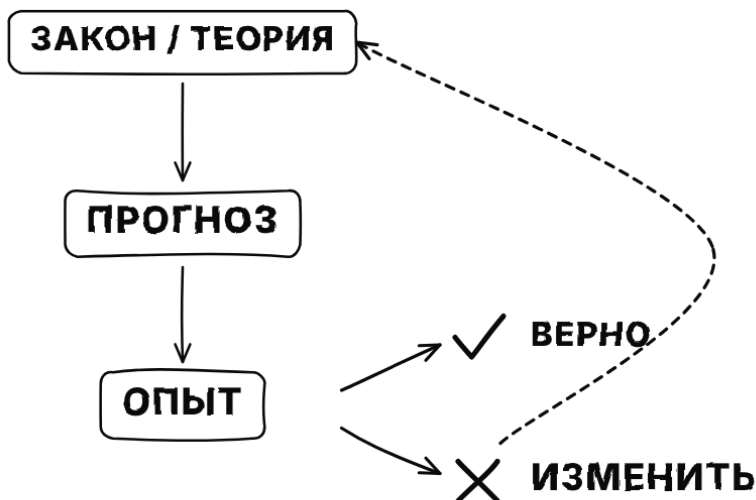
$$40 \text{ kg} \times 2 \text{ m/s}^2 = 80 \text{ N}$$

Второй закон Ньютона, $F = ma$

Чем законы отличаются от теорий? В одном они похожи: и те и другие — научные утверждения, выросшие из проверенных гипотез и подкреплённые данными. Но слово «закон» оставляют для утверждения короткого и очень общего, вроде $F = ma$. Теория — менее краткое изложение; теорию эволюции и теорию относительности не втиснуть в одно короткое утверждение, поэтому их не называют законами. Закон описывает один вид действия, а теория объясняет целую группу связанных событий, и теория гораздо сложнее и изменчивее. Книга выражает это противопоставление одной строкой: закон — исходное допущение, на котором строит научный метод, а теория — конечный результат этого метода. Утверждения с более узкой областью применения обычно называют принципами, например

принцип Паскаля, действующий только в жидкостях и газах, хотя люди не всегда строго различают эти слова.

Модели, теории и законы нужны не только для того, чтобы привести в порядок уже собранные данные. Часто, как только одна из них установлена, она указывает учёным путь к открытиям, которых иначе никогда бы не было. Иногда из них следует, что существует нечто, чего ещё никто не видел, и когда это потом находят, это замечательная победа науки. Книга приписывает такие впечатляющие предсказания глубинному порядку Вселенной. Но правило действует в обе стороны: если эксперимент не подтверждает предсказание, теория или закон неверны, какими бы изящными или удобными они ни были.



Предсказание встречается опыт

Вот почему закон никогда нельзя знать с абсолютной уверенностью. Чтобы быть уверенными, пришлось бы поставить все мыслимые опыты во всех возможных ситуациях, а этого никто не может. Поэтому физики считают законы и теории верными, пока не замечен противоречащий пример. Если качественный, проверяемый эксперимент противоречит прочно установленному закону, закон нужно изменить или полностью отбросить. Иначе говоря, закону доверяют, но он никогда не выходит из-под власти следующего тщательного опыта.

Книга называет науку приключением, похожим на исследование неизведанного океана: совершаются открытия, складываются модели, теории и законы, и Вселенная кажется тем прекраснее, чем больше мы узнаём.

У способа работы, стоящего за этим приключением, есть своя история. Ибн аль-Хайсам, которого иногда называют Альхазеном, работал в Каире в X и XI веках и сильно продвинул понимание оптики и зрения. Ещё важнее был его образ мысли. Показывая, что прежние представления неверны, он настаивал, что учёный должен быть готов отвергнуть существующее знание и стать «врагом» всего, что читает, доверяя только объективным свидетельствам. Он подчёркивал, что опыты нужно повторять, а результаты проверять, и предупреждал, что органы чувств и наши ожидания могут вести к неверным выводам. Его работа предвосхитила научный метод, которым мы пользуемся сегодня.

Книга излагает метод как последовательность шагов. Обычно он начинается с наблюдения и вопроса для исследования. Затем идёт изучение темы, а потом гипотеза — предполагаемый ответ, который можно проверить. Затем гипотезу проверяют

экспериментом. Наконец, результаты анализируют и делают вывод. Взвесить муку на кухонных весах, чтобы проверить, действительно ли «один стакан» из рецепта всякий раз одинаков, — крошечный пример: вопрос, догадка, проверка, вывод. И книга добавляет, что этот метод не только для науки: им можно пользоваться во многих ситуациях, приспособив его к ним.

Запомним

Второй закон Ньютона, $F = ma$, говорит, что нужная сила равна массе, умноженной на ускорение, так что двадцатикилограммовой тележке, разгоняющейся на два метра в секунду каждую секунду, нужно сорок ньютонов. Закон — короткое общее утверждение об одной закономерности; теория — более широкое и сложное объяснение целой группы событий, как эволюция или относительность. Законы и теории могут предсказывать ещё не виденное, но любое предсказание, не подтвердившееся в тщательном опыте, показывает, что они неверны. Ни один закон никогда не бывает несомненным, потому что никто не может поставить все возможные опыты. Научный метод ведёт от наблюдения и вопроса через изучение темы и гипотезу к эксперименту, анализу и выводу.

Вопросы

1. Что произойдёт в $F = ma$ с нужной силой, если массу удвоить, а ускорение оставить прежним?

- a. Она удвоится
 - b. Она уменьшится вдвое
 - c. Она не изменится
 - d. Она станет в четыре раза больше
2. Почему теорию относительности называют теорией, а не законом?
- a. Потому что её никогда не проверяли
 - b. Потому что она слишком новая
 - c. Потому что она объясняет целую группу событий и не умещается в одно короткое утверждение
 - d. Потому что это всего лишь догадка
3. Почему закон никогда нельзя знать с абсолютной уверенностью?
- a. Потому что законы меняются каждый год
 - b. Потому что никто не может поставить все мыслимые опыты во всех возможных ситуациях
 - c. Потому что законы — всего лишь догадки
 - d. Потому что учёные о них спорят
4. Что в научном методе идёт сразу после гипотезы?
- a. Вывод
 - b. Наблюдение
 - c. Изучение темы
 - d. Эксперимент, который её проверяет

Ответы

1. **a)** Двойная масса — как две тележки бок о бок, каждой нужен свой толчок, поэтому сила удваивается.
2. **с)** Теория — менее краткое изложение целой группы связанных событий; теорию относительности нельзя уместить в одно короткое утверждение.
3. **b)** Чтобы быть уверенными, пришлось бы поставить все возможные опыты, поэтому законы считают верными, пока не появится противоречащий пример.
4. **d)** Метод ведёт от наблюдения и вопроса к изучению темы и гипотезе, а затем гипотезу проверяют экспериментом.

Разобранные примеры

Сила, действующая на гружёную тележку Тележка массой 20 кг каждую секунду прибавляет 2 м/с скорости. Какая сила ей нужна? А если её масса 40 кг при том же ускорении?

Воспользуемся вторым законом Ньютона, $F = ma$.

$$F = 20 \text{ кг} \times 2 \text{ м/с}^2 = 40 \text{ Н.}$$

$$\text{При } m = 40 \text{ кг: } F = 40 \text{ кг} \times 2 \text{ м/с}^2 = 80 \text{ Н.}$$

Удвоение массы при том же ускорении удваивает силу.

Ответ: 40 Н и 80 Н

Задачи

1. Ящик массой 12 кг толкают так, что он каждую секунду прибавляет 0,5 м/с скорости. Какая сила на него действует?

Подсказка: Умножьте массу на ускорение.

$$\text{Ответ: } 6 \text{ Н: } F = 12 \text{ кг} \times 0,5 \text{ м/с}^2 = 6 \text{ Н.}$$

2. На тележку массой 30 кг действует сила 90 Н. Каково её ускорение?

Подсказка: Проверните $F = ma$: $a = F/m$.

Ответ: 3 м/с²: $a = 90 \text{ Н} \div 30 \text{ кг} = 3 \text{ м/с}^2$, то есть каждую секунду она прибавляет 3 м/с скорости.

3. Красивая теория предсказывает нечто, чего тщательный, повторяемый эксперимент не обнаруживает. Что, по словам лекции, из этого следует?

Подсказка: Вспомните, что происходит, когда эксперимент не подтверждает предсказание.

Ответ: Теория неверна, какой бы изящной или удобной она ни была, и её нужно изменить или отбросить. Решает опыт, а не изящество.

От натуральной философии к классической физике

Холодным утром вы поворачиваете ключ, а машина не заводится. Что вы делаете? Книга берёт именно эту сцену, чтобы показать научный метод в обычной жизни.



Почему машина не заводится?

Вопрос простой: почему машина не заводится? Сначала вы выясняете, по каким причинам машина может отказать. Затем формулируете гипотезу: может быть, в двигателе нет масла. Чтобы её проверить, вы открываете капот и смотрите уровень

масла. Масло оказывается на нормальном уровне, и вы заключаете, что дело не в нём. А затем важный шаг: вы выдвигаете новую гипотезу, проверяете её и повторяете процесс, пока не найдёте причину. Иначе говоря, неудачная догадка не пропадает зря: она вычёркивает одного подозреваемого из списка. Так же идёт починка телефона, который не заряжается: вы подозреваете кабель, пробуете другой, и если телефон всё равно не заряжается, переходите к следующему подозреваемому — зарядному блоку или розетке.

Теперь книга обращается к истории. Физика не всегда была отдельным предметом и даже сегодня остаётся связанной с другими науками. Слово «физика» происходит от греческого слова «природа», а изучение природы долго называлось натуральной философией. С древности и до эпохи Возрождения натуральная философия охватывала сразу астрономию, биологию, химию, физику, математику и медицину. Греческий философ Аристотель, например, писал о физике, животных, душе, политике и поэзии. За последние несколько веков, по мере роста знаний, натуральная философия разветвилась на всё более узкие области, а физика сохранила самые основные части. Иллюстрации книги показывают некоторых великих учёных на этом пути: Ибн аль-Хайсама и Галилео Галилея, настолько важных для научной практики, что позднейший учёный поместил обоих на обложку своего главного труда, и Нильса Бора, который в XX веке помогал строить квантовую механику.

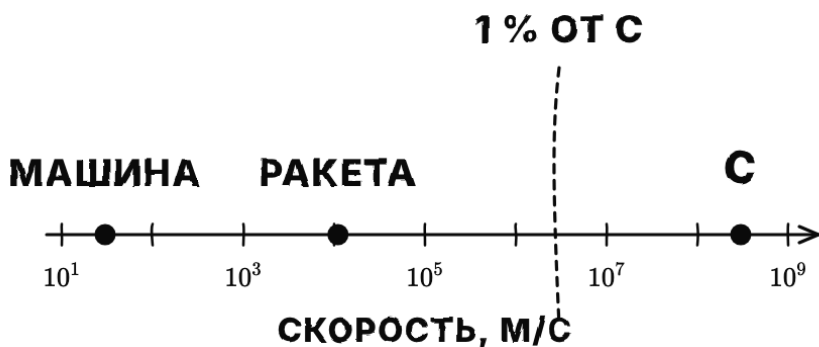


Ветви натуральной философии

Физику в том виде, в каком она выросла от Возрождения до конца XIX века, называют классической. В начале XX века революционные открытия превратили её в современную физику.

Вот ключевой момент. Классическая физика не точное описание Вселенной, но превосходное приближение при трёх условиях. Во-первых, вещество должно двигаться медленнее примерно одного процента скорости света. Во-вторых, объекты должны быть достаточно большими, чтобы их можно было разглядеть в микроскоп. В-третьих, в игре может быть только слабое тяготение, например тяготение Земли.

$$v < 0.01 c$$



Один процент скорости света

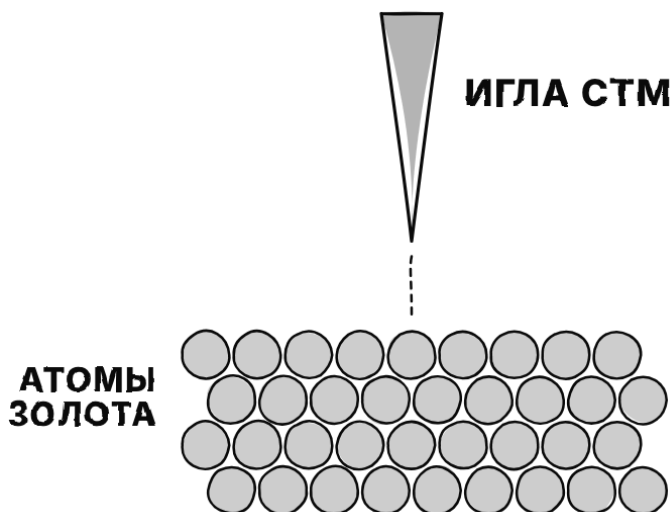
Первое условие можно записать формулой: $v < 0,01c$. Здесь v — скорость объекта, а c — скорость света, около 3×10^8 м/с.

Словами: скорость объекта должна быть меньше одной сотой скорости света. Откуда берётся один процент, если идти от интуиции? Погрешности классической физики растут со скоростью; намного ниже скорости света они так малы, что никакое обычное измерение их не замечает. Теперь посчитаем вслух. Одна сотая от трёх на десять в восьмой степени метров в секунду — это 3×10^6 м/с, то есть три тысячи километров в секунду. Машина на шоссе, едущая примерно тридцать метров в секунду, то есть около ста километров в час, в сто тысяч раз медленнее этого предела. Даже ракета, покидающая Землю со скоростью около одиннадцати километров в секунду, движется

медленнее половины одного процента скорости света, так что классическая физика ей прекрасно служит.

Опыт

Поднимите большой палец на вытянутой руке и посмотрите мимо него на комнату. Всё, что вы видите, движется медленно, достаточно велико, чтобы его видеть, и находится в слабом тяготении Земли. Все три условия классической физики выполнены сразу, вот почему она кажется здравым смыслом.



Увидеть атомы

Поскольку мы живём именно в этих условиях, классическая физика кажется естественной, а многое в современной физике — странным. Вот почему модели так полезны в современной физике: они позволяют представить то, чего мы никогда не испытываем, например тела, движущиеся с огромными скоростями, или объекты, слишком малые для наших органов чувств. Мы понимаем свойства атома, потому что можем представить его себе, хотя никто не видел атом невооружённым глазом. Помогают и новые инструменты. Сканирующий туннельный микроскоп теперь позволяет учёным «видеть» отдельные атомы золотой пластинки, выстроенные, как апельсины в ящике.

Современная физика дала некоторые из самых впечатляющих достижений науки. Многие классические законы были изменены или отвергнуты, и вместе с ними изменились техника, общество и наш взгляд на Вселенную. Современная физика полна объектов страннее научной фантастики, с тем преимуществом, что они реальны.

Почему же тогда бóльшая часть книги по-прежнему учит классической физике? Книга называет две причины. Во-первых, классическая физика чрезвычайно точно описывает Вселенную в широком круге повседневных ситуаций; наша машина на шоссе — прекрасный пример. Во-вторых, без классической физики вообще невозможно понять современную. Иначе говоря, классическая физика — и повседневный инструмент, и фундамент, на котором построена более новая физика.

Запомним

Проверить гипотезу, увидеть, что она неверна, и выдвинуть новую, как с машиной, которая не заводится, — это научный метод в повседневной жизни. Физика выросла из натуральной философии, которая когда-то охватывала все науки; физика сохранила самые основные части.

Классическая физика работает, когда скорости меньше примерно одного процента скорости света, объекты видны в микроскоп, а тяготение слабое. Один процент скорости света — это три тысячи километров в секунду, так что машины и даже ракеты с запасом укладываются в классическую физику. Большая часть книги учит классической физике, потому что она очень точна для повседневной жизни и служит фундаментом современной физики.

Вопросы

1. Что велит делать научный метод, когда выяснилось, что уровень масла у незаводящейся машины в норме?
 - a. Заключить, что машину уже не починить
 - b. Выдвинуть новую гипотезу и проверить её
 - c. Проверять масло, пока проверка не провалится
 - d. Остановиться, потому что проверка не удалась
2. Что произошло с натуральной философией по мере роста знаний?

- a. Она разделилась на специальные области, а физика сохранила самые основные части
 - b. Её полностью забросили
 - c. Она слилась с медициной
 - d. Её заменила одна астрономия
3. Почему классическая физика кажется нам здравым смыслом?
- a. Потому что это самая новая физика
 - b. Потому что её открыл Аристотель
 - c. Потому что она точно описывает Вселенную
 - d. Потому что мы живём среди малых скоростей, видимых объектов и слабого тяготения
4. Ракета покидает Землю со скоростью около 11 км/с. Достаточно ли классической физики, чтобы её описать?
- a. Нет, ракетам нужна теория относительности
 - b. Нет, она слишком большая
 - c. Да, потому что 11 км/с — меньше половины одного процента скорости света
 - d. Да, потому что ракеты видны только с Земли

Ответы

1. **б)** Неудачная догадка вычёркивает одного подозреваемого; вы выдвигаете новую гипотезу и повторяете, пока не найдёте причину.
2. **а)** За последние несколько веков натуральная философия разветвилась на специальные области, а физика сохранила самые основные части.

3. d) Мы живём именно там, где выполняются три условия классической физики, поэтому она кажется естественной.

4. c) Предел — около 3000 км/с; 11 км/с намного ниже, так что классическая физика прекрасно подходит.

Разобранные примеры

Предел скорости классической физики Пользуясь условием $v < 0,01c$ при $c = 3 \times 10^8$ м/с, найдите скорость, ниже которой классическая физика хорошо работает, в м/с и км/с.

Условие говорит, что v должна быть меньше одной сотой c .

$$0,01 \times 3 \times 10^8 \text{ м/с} = 3 \times 10^6 \text{ м/с}.$$

Разделите на 1000, чтобы перейти от метров к километрам: 3×10^3 км/с.

Значит, предел — около 3000 км в секунду.

Ответ: 3×10^6 м/с, или 3000 км/с

Задачи

1. Машина едет со скоростью 30 м/с. Во сколько раз она медленнее предела классической физики 3×10^6 м/с?

Подсказка: Разделите предел на скорость машины.

Ответ: В 10^5 , то есть в сто тысяч раз: $3 \times 10^6 \div 30 = 10^5$.

2. Частица в ускорителе движется со скоростью 6×10^7 м/с. Выполняется ли для неё условие $v < 0,01c$ при $c = 3 \times 10^8$ м/с?

Подсказка: Сравните с $0,01c = 3 \times 10^6$ м/с.

Ответ: Нет: 6×10^7 м/с — это в двадцать раз больше предела 3×10^6 м/с, то есть 20 % от c , так что классической физики недостаточно.

3. Назовите две причины, по которым книга учит в основном классической физике.

Подсказка: Одна касается точности в повседневной жизни, другая — современной физики.

Ответ: Классическая физика чрезвычайно точно описывает Вселенную в широком круге повседневных ситуаций, и она нужна, чтобы понять современную физику.

Очень быстрое, очень малое и зачем нужны единицы

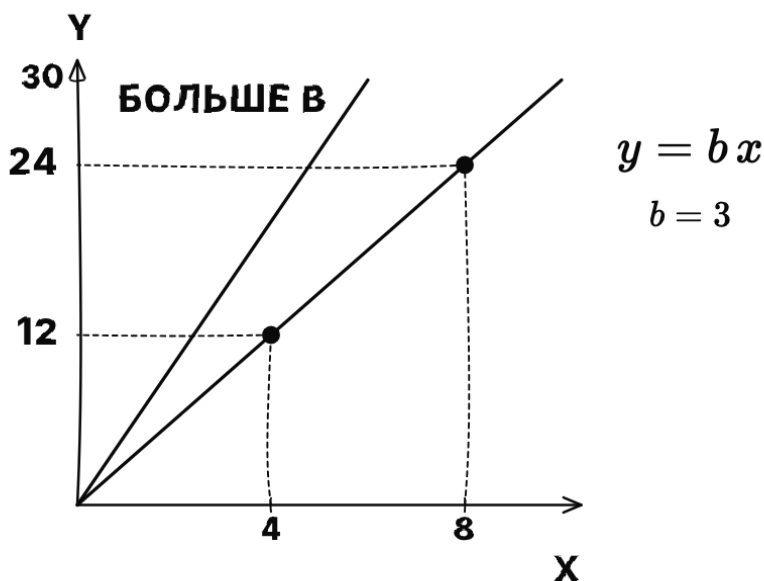
Представьте, что знакомый звонит и говорит: «Я сегодня прошёл двенадцать». Двенадцать чего? Двенадцать шагов, двенадцать кварталов, двенадцать километров? Само по себе число бесполезно, и в книге даже есть картинка с такой подписью: расстояния в неизвестных единицах бесполезны до отчаяния. Но прежде чем перейти к единицам, книга заканчивает рассказ о том, где в дело вступает современная физика.



Какую теорию выбрать

Современная физика стоит на двух революционных теориях: теории относительности и квантовой механике. Теория относительности имеет дело с очень быстрым, квантовая механика — с очень малым. Теорией относительности нужно пользоваться всякий раз, когда тело движется быстрее примерно одного процента скорости света или испытывает сильное гравитационное поле, например вблизи Солнца. Квантовой механикой нужно пользоваться для объектов, слишком малых, чтобы разглядеть их в микроскоп. Объедините их, и получится релятивистская квантовая механика, описывающая малые объекты, которые движутся очень быстро или испытывают сильное тяготение. Это лучшая из имеющихся у нас теорий, применимая везде, но она так сложна математически, что ею пользуются только при необходимости; более простые теории применяют всякий раз, когда они достаточно точны. И книга обещает, что очень многое в современной физике всё же можно сделать с обычной алгеброй и тригонометрией.

Заметьте, что теорию относительности и квантовую механику называют теориями. Книга проверяет эту мысль маленькой загадкой. Знакомый говорит, что узнал новый закон природы. Ещё не услышав его, вы знаете, что это будет краткое описание Вселенной, формулировка правила, которому следуют все природные процессы. Если бы знакомый узнал теорию, вы бы знали, что это крупное, широко применимое обобщение.

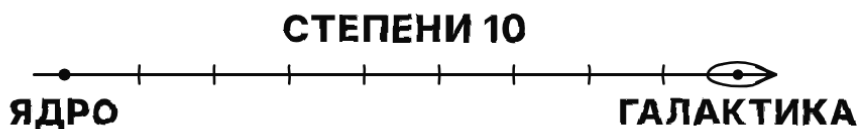


Прямая $y = bx$

Рядом книга указывает на онлайн-графопостроитель для кривых, составленных из нескольких слагаемых, — многочленов. Один из простейших его элементов — прямая $y = bx$, где b — постоянное число, а x может меняться. Словами: y всегда равен b , умноженному на x , так что удвоение x удваивает y . Например, при $b = 3$ и $x = 4$ получаем $y = 12$; при $x = 8$ — $y = 24$. Изменение b наклоняет прямую, а добавление других слагаемых изгибает её в кривую.

Теперь новый раздел: физические величины и единицы. Книга открывается поразительным снимком Земли и Луны и замечает, что расстояние между ними, каким бы огромным оно ни казалось, — крошечная доля расстояний до других небесных тел.

Круг того, что изучает физика, огромен: от невероятно короткой жизни атомного ядра до возраста Земли, от частиц меньше ядра до краёв известной Вселенной, от толчка прыгающей блохи до притяжения между Землёй и Солнцем. Здесь, говорит книга, столько степеней десяти, что они растянут воображение даже самого опытного учёного.



Четыре основные величины

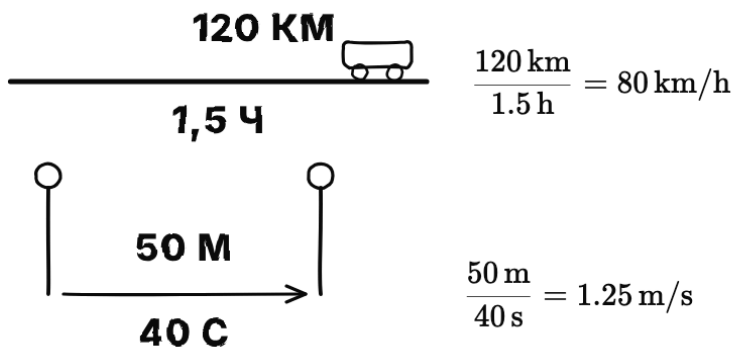
Если приписать величинам числа, а принципам — уравнения, природу можно понять гораздо глубже, чем одними словами. Но чтобы управляться с такими огромными диапазонами, нужны общепринятые единицы. И здесь, говорит книга, проявляется глубокая простота: большинство физических величин можно

построить всего из четырёх основных — длины, массы, времени и силы электрического тока.

Как определяют физическую величину? Одним из двух способов: указывая, как её измеряют, или указывая, как её вычисляют из других измерений. Расстояние и время определяются тем, как мы их измеряем. Средняя скорость определяется вычислением: $\text{средняя скорость} = \text{расстояние} / \text{время}$. Словами: сколько вы проехали, поделённое на то, сколько это заняло. Допустим, бортовой компьютер машины показывает, что вы проехали сто двадцать километров за полтора часа; ваша средняя скорость была сто двадцать, делённые на полтора, то есть восемьдесят километров в час. Заметьте, что спидометр в разные моменты мог показывать больше или меньше; среднее говорит только об общем темпе.

$$v = \frac{d}{t}$$

СР. СКОРОСТЬ



Средняя скорость

Опыт

Пройдите отмеренный отрезок, скажем пятьдесят метров между двумя фонарными столбами, и засекийте время секундомером телефона. Если это заняло сорок секунд, разделите пятьдесят на сорок. Ваша средняя скорость ходьбы — одна целая и одна четверть метра в секунду.

Результаты измерений даются в единицах — стандартизованных значениях. Длину забега, например, указывают в метрах для спринтеров и в километрах для стайеров. Без согласованных единиц учёным было бы чрезвычайно трудно сообщать и

сравнивать то, что они измеряют; отсюда и «бесполезные до отчаяния» расстояния в неизвестных единицах.

В мире используются две большие системы единиц. Одна — система СИ, её также называют метрической. Другая — система английских единиц, называемых также традиционными или имперскими; исторически её применяли в странах, когда-то входивших в Британскую империю, и до сих пор широко используют в США. Почти все остальные страны теперь используют в качестве стандарта единицы СИ, а метрическая система — это стандарт, о котором договорились учёные и математики. Буквы СИ происходят от французского названия *Système International* — Международная система. Благодаря ей граммы на ваших кухонных весах и миллиграммы на этикетке лекарства означают одно и то же в любой стране.

Запомним

Теория относительности нужна для скоростей выше примерно одного процента скорости света или сильного тяготения, квантовая механика — для того, что слишком мало, чтобы видеть в микроскоп. Закон — краткая формулировка правила; теория — крупное, широко применимое обобщение. Большинство физических величин можно построить из четырёх основных: длины, массы, времени и силы электрического тока. Величину определяют либо по тому, как её измеряют, либо по тому, как её вычисляют, — так средняя скорость есть расстояние, делённое на время. Согласованные единицы необходимы, и система СИ, или метрическая, — стандарт, которым пользуются учёные и большая часть мира.

Вопросы

1. Объект меньше, чем можно разглядеть в микроскоп. Какой теорией нужно пользоваться?
 - a. Теорией относительности
 - b. Квантовой механикой
 - c. Классической физикой
 - d. Теорией газов
2. Что происходит с y в $y = bx$ при $b = 3$, когда x удваивается с 4 до 8?

- a. Он удваивается с 12 до 24
 - b. Он остаётся равным 12
 - c. Он увеличивается на 3
 - d. Он становится в четыре раза больше
3. Какая пара показывает два способа определить физическую величину?
- a. По размеру или по цвету
 - b. По единице или по обозначению
 - c. По тому, как её измеряют, или по тому, как её вычисляют из других измерений
 - d. опытом или теорией
4. Бортовой компьютер показывает 120 км за 1,5 часа. О чём говорит средняя скорость 80 км/ч?
- a. Спидометр всё время показывал 80 км/ч
 - b. Наибольшая скорость была 80 км/ч
 - c. Машина ни разу не останавливалась
 - d. Об общем темпе: расстояние, поделённое на всё время

Ответы

1. **b)** Для объектов, слишком малых, чтобы разглядеть их в микроскоп, нужно пользоваться квантовой механикой.
2. **a)** y всегда равен b , умноженному на x , поэтому удвоение x удваивает y .
3. **c)** Расстояние и время определяются тем, как мы их измеряем, а средняя скорость — вычислением.

4. d) Средняя скорость — это расстояние, делённое на время; в разные моменты спидометр мог показывать больше или меньше.

Разобранные примеры

Средняя скорость поездки Машина проезжает 120 км за 1,5 ч. Какова её средняя скорость?

Средняя скорость = расстояние / время.

Подставим: 120 км / 1,5 ч.

$$120 \div 1,5 = 80.$$

Ответ: 80 км/ч

Задачи

1. Вы проходите 50 м между двумя фонарными столбами за 40 с. Какова ваша средняя скорость?

Подсказка: Разделите расстояние на время.

Ответ: 1,25 м/с: $50 \text{ м} \div 40 \text{ с} = 1,25 \text{ м/с}$.

2. Средняя скорость велосипедиста — 18 км/ч за поездку длиной 2,5 ч. Какое расстояние он проехал?

Подсказка: Средняя скорость = расстояние/время, значит, расстояние = средняя скорость $\times$ время.

Ответ: 45 км: $18 \text{ км/ч} \times 2,5 \text{ ч} = 45 \text{ км}$.

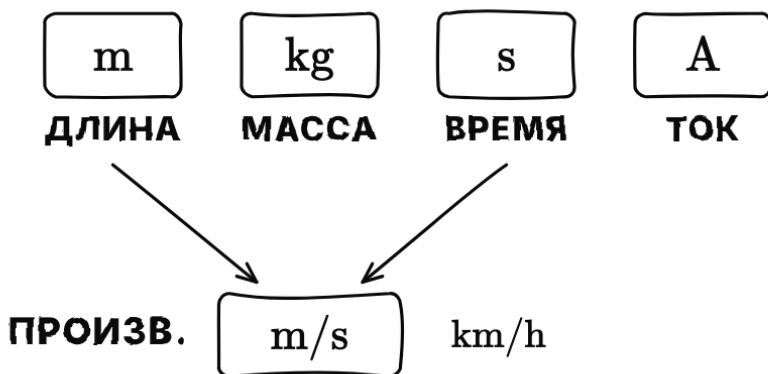
3. В $y = bx$ получается $y = 20$ при $x = 5$. Чему равно b и чему равен y при $x = 7$?

Подсказка: Найдите b , разделив y на x .

Ответ: $b = 4$, так как $20 \div 5 = 4$; тогда $y = 4 \times 7 = 28$.

Четыре кирпичика и секунда

Сколько на самом деле длится одна секунда? Можно сказать: столько, сколько нужно, чтобы произнести «двадцать один». Науке нужно нечто гораздо лучшее, и история секунды показывает почему.



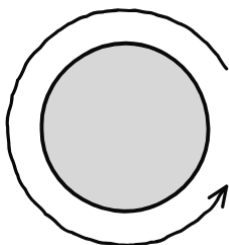
Четыре основные единицы СИ

Сначала кирпичики. В таблице книги перечислены четыре основные единицы СИ: метр (m) для длины, килограмм (kg) для массы, секунда (s) для времени и ампер (A) для силы электрического тока, до которого книга дойдёт гораздо позже.

Самые фундаментальные величины можно определить только через процедуру их измерения, и их единицы называют основными единицами. Любая другая величина, например сила или электрический заряд, — алгебраическое сочетание этих четырёх, и её единица — производная. Простейший пример — скорость: скорость = длина/время, поэтому её единица — метр в секунду, м/с. Километры в час на спидометре вашей машины — производная единица того же рода: длина, делённая на время. Книга пользуется несколькими единицами вне СИ там, где они очень распространены, например миллиметрами ртутного столба, мм рт. ст., для кровяного давления, и всегда связывает их с единицами СИ через перевод.

Теперь секунда. Много лет её определяли как долю суток: $1\text{ с} = 1/86\,400$ средних солнечных суток. Откуда берётся восемьдесят шесть тысяч четыреста? В сутках двадцать четыре часа, в каждом часе шестьдесят минут, в каждой минуте шестьдесят секунд: двадцать четыре на шестьдесят — тысяча четыреста сорок минут, и ещё раз на шестьдесят — восемьдесят шесть тысяч четыреста секунд. Но вращение Земли очень постепенно замедляется, так что солнечные сутки медленно удлиняются, и привязанная к ним единица медленно уплывала бы.

1 СУТКИ



$$24 \times 60 \times 60 = 86\,400$$

ЦЕЗИЙ



9,192,631,770

КОЛЕБАНИЯ = 1 С

ЗАМЕДЛЕНИЕ

Как определили секунду

Поэтому выбрали новый эталон, основанный на том, что не меняется. Атомы цезия можно заставить колебаться очень равномерно, и эти колебания можно сосчитать. В 1967 году секунду переопределили как время, за которое совершается ровно 9 192 631 770 таких колебаний. Словами: отсчитайте чуть больше девяти миллиардов колебаний цезия — и прошла одна секунда. Атомные часы, построенные на этом, идут с ошибкой меньше миллионной доли секунды в год. Часы в вашем телефоне регулярно подправляются сигналами, которые восходят к таким атомным часам.

Зачем столько хлопот о точности? Потому что каждое измерение в конце концов выражается в основных единицах, и ни одно

измерение не может быть точнее самих единиц. Иначе говоря, линейка не может быть лучше метра, который она копирует, а секундомер — лучше секунды, которую он считает.

Запомним

Четыре основные единицы СИ здесь — метр, килограмм, секунда и ампер; все прочие единицы, вроде метров в секунду, производные от них. Когда-то секунда была одной восемьдесят шесть тысяч четырёхсотой долей суток, но сутки медленно удлиняются. С 1967 года секунда — это время 9 192 631 770 колебаний атома цезия. Все измерения опираются на основные единицы, поэтому они не могут быть точнее этих единиц.

Вопросы

1. Почему секунду переопределили через атомы цезия, а не через длительность суток?
 - a. Потому что вращение Земли медленно замедляется и сутки постепенно удлиняются
 - b. Потому что сутки слишком длинны для измерения
 - c. Потому что цезий легче увидеть
 - d. Потому что в сутках ровно 86 400 секунд
2. Почему единицу скорости называют производной?
 - a. Потому что скорость измеряют спидометром

- b. Потому что она построена из основных единиц: длина, делённая на время
 - c. Потому что ею пользуются только в машинах
 - d. Потому что её определили в 1967 году
3. Почему так важна точность основных единиц?
- a. Потому что ими пользуются только учёные
 - b. Потому что они дорогие
 - c. Потому что каждое измерение выражается в них и не может быть точнее их
 - d. Потому что они меняются каждый год
4. Что из этого НЕ входит в четыре основные единицы СИ, перечисленные в книге?
- a. Метр
 - b. Ампер
 - c. Секунда
 - d. Ньютон

Ответы

1. **a)** Единица, привязанная к медленно удлиняющимся суткам, уплывала бы; колебания цезия не меняются.
2. **b)** Скорость = длина/время, поэтому её единица, метр в секунду, — алгебраическое сочетание основных единиц.
3. **c)** Линейка не может быть лучше метра, который она копирует, а секундомер — лучше секунды, которую он считает.
4. **d)** Четыре основные — метр, килограмм, секунда и ампер; такие единицы, как ньютон, производные.

Разобранные примеры

Секунды в сутках Покажите, что старое определение $1 \text{ с} = 1/86\,400$ суток согласуется с 24 часами по 60 минут по 60 секунд.

В сутках 24 ч.

$$24 \text{ ч} \times 60 \text{ мин/ч} = 1440 \text{ мин.}$$

$$1440 \text{ мин} \times 60 \text{ с/мин} = 86\,400 \text{ с.}$$

Значит, одна секунда — это $1/86\,400$ суток.

Ответ: 86 400 с в сутках

Задачи

1. Сколько секунд в одной неделе, если в сутках 86 400 с?

Подсказка: Умножьте на число дней.

Ответ: 604 800 с: $7 \times 86\,400 = 604\,800$.

2. Примерно сколько колебаний цезия происходит за одну минуту, если их 9 192 631 770 в секунду?

Подсказка: Умножьте на 60.

Ответ: Около $5,5 \times 10^{11}$: $9\,192\,631\,770 \times 60 = 551\,557\,906\,200$.

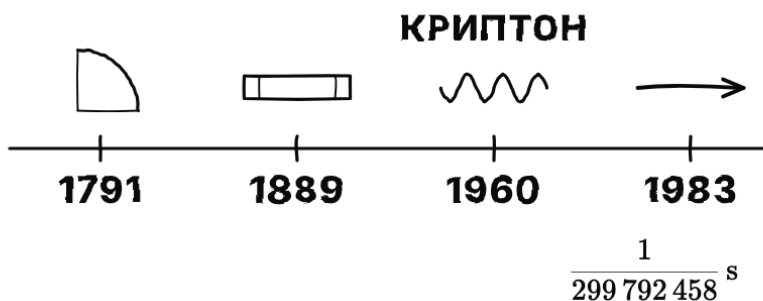
3. Выразите 10 м/с в километрах в час.

Подсказка: Умножьте на 3600 с в часе, затем разделите на 1000 м в километре.

Ответ: 36 км/ч: $10 \times 3600 = 36\,000$ м каждый час, то есть 36 км.

Метр и килограмм

Откуда в конце концов берётся метр на вашей рулетке? Бóльшую часть истории ответ был таким: «от некоего предмета, хранящегося в надёжном месте». Сегодня ответ — «от света», и эта перемена показывает, как измерения становятся всё точнее.



Четыре определения метра

Метр (м) впервые определили в 1791 году как одну десятиmillionную долю расстояния от экватора до Северного полюса. В 1889 году его переопределили как расстояние между двумя штрихами, нанесёнными на стержень из платины и

иридия, который теперь хранится под Парижем. К 1960 году свет мог справиться лучше, и метр стал равен 1 650 763,73 длины волны оранжевого света, испускаемого атомами криптона. С 1983 года это расстояние, которое свет проходит в вакууме за $1/299\,792\,458$ с.

Подпись в книге объясняет рассуждение: пройденное расстояние равно скорости, умноженной на время, $d = ct$. Здесь d — расстояние, c — скорость света, а t — время. Новое определение фиксирует $c = 299\,792\,458$ м/с ровно. Подставим время: $d = 299\,792\,458$ м/с $\times 1/299\,792\,458$ с = 1 м. Большие числа сокращаются, и остаётся ровно один метр. Так что само число больше никогда не изменится: более точное измерение лишь позволило бы точнее отмерять метр. Рулетка в вашем ящике была сверена с копиями, которые шаг за шагом восходят к этому определению.

$$d = ct$$

$$c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$$

$$d = 299\,792\,458 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times \frac{1}{299\,792\,458} \text{ s} = 1 \text{ m}$$

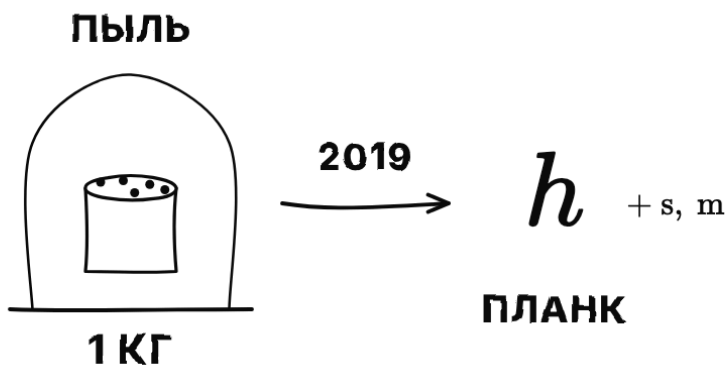
СОКРАЩАЮТСЯ

1 m

Почему свет даёт ровно метр

Теперь килограмм (кг). Раньше это была масса одного платино-иридиевого цилиндра, хранившегося вместе со старым эталоном метра в Международном бюро мер и весов под Парижем. Точные копии хранились и в других местах, в том числе в Национальном институте стандартов и технологий США, NIST, в Гейтерсберге (штат Мэриленд), под Вашингтоном. Любую другую массу в конечном счёте можно было свести к сравнению с этим цилиндром. Но хотя цилиндр был стоек к коррозии, частицы из воздуха прилипали к его поверхности и медленно меняли его массу. В мае 2019 года учёные приняли более устойчивое определение, построенное на секунде, метре и постоянной Планка h — квантовой величине, связывающей энергию частицы света с её частотой. Килограмм на ваших кухонных весах теперь

опирается через цепочку сравнений на постоянную природы, а не на кусок металла.



Как определили килограмм

Четвёртая основная единица, ампер для силы электрического тока, появится гораздо позже, вместе с электричеством и магнетизмом. Первые части книги посвящены механике, жидкостям и газам, теплоте и волнам, и там любую величину можно построить из одних только длины, массы и времени. Иначе говоря, три единицы — метр, килограмм и секунда — проведут нас через первую половину физики.

Запомним

Метр прошёл путь от доли размера Земли через штрихи на стержне и свет криптона к расстоянию, которое свет проходит за $1/299\,792\,458$ секунды. Поскольку $d = ct$, это определение делает скорость света равной ровно $299\,792\,458$ м/с. Килограмм был металлическим цилиндром, который медленно менялся; с 2019 года он определяется через секунду, метр и постоянную Планка. Для механики, жидкостей и газов, теплоты и волн достаточно длины, массы и времени.

Вопросы

1. Раз метр определяется через свет, что изменило бы более точное измерение скорости света?
 - a. Число $299\,792\,458$
 - b. Длину метра
 - c. Только то, насколько точно лаборатории могут отмерять метр
 - d. Длину секунды
2. Почему в $d = ct$ при $t = 1/299\,792\,458$ с расстояние d ровно один метр?
 - a. Потому что большие числа сокращаются и остаётся 1 м
 - b. Потому что свет очень быстр
 - c. Потому что одна секунда коротка

- d. Потому что метр был стержнем в Париже
3. Какая проблема была у платино-иридиевого килограмма?
- a. Он быстро корродировал
 - b. Он был не того размера
 - c. К нему прилипали частицы из воздуха и медленно меняли его массу
 - d. Его потеряли в 2019 году
4. Каких единиц достаточно для механики, жидкостей и газов, теплоты и волн?
- a. Одного ампера
 - b. Метра и ампера
 - c. Всех четырёх, включая ампер
 - d. Метра, килограмма и секунды

Ответы

1. c) Скорость света теперь точна по определению, так что число измениться не может; более точное измерение лишь облегчает точную разметку метра.
2. a) $c = 299\,792\,458$ м/с, умноженное на $1/299\,792\,458$ с, даёт ровно 1 м.
3. c) Хотя цилиндр был стоек к коррозии, на нём оседали частицы из воздуха, медленно меняя его массу.
4. d) В этих первых темах любую величину можно построить из длины, массы и времени.

Разобранные примеры

Путь света за заданное время Пользуясь формулой $d = ct$ при $c = 299\,792\,458$ м/с, найдите, какое расстояние свет проходит за $1/299\,792\,458$ с.

Расстояние равно скорости, умноженной на время.

$$d = 299\,792\,458 \text{ м/с} \times 1/299\,792\,458 \text{ с.}$$

Числа сокращаются, секунды сокращаются, остаются метры.

Ответ: ровно 1 м

Задачи

1. Пользуясь формулой $d = ct$ и $c \approx 3,00 \times 10^8$ м/с, найдите, какое расстояние свет проходит за 0,0010 с.

Подсказка: Умножьте скорость на время.

Ответ: $3,0 \times 10^5$ м, то есть 300 км: $3,00 \times 10^8 \times 0,0010 = 3,0 \times 10^5$.

2. В 1791 году метр составлял одну десятиmillionную долю расстояния от экватора до Северного полюса. Каким было это расстояние в километрах по такому определению?

Подсказка: Это расстояние равно десяти миллионам метров.

Ответ: 10 000 км: 10 000 000 м, делённые на 1000 м в километре.

Приставки и порядки величины

На этикетке лекарства написано: двести пятьдесят миллиграммов. Карта в телефоне показывает двенадцать километров. На коробке роутера написано: два и четыре десятых гигагерца. Три разные приставки — милли, кило и гига, — и каждая всего лишь степень десяти, приставленная к единице.



$$100 \text{ cm} = 1 \text{ m}, \quad 1000 \text{ m} = 1 \text{ km}$$

$$12 \text{ in} = 1 \text{ ft}, \quad 5280 \text{ ft} = 1 \text{ mi}$$

Приставки на повседневных этикетках

Единицы СИ принадлежат метрической системе, удобной для науки и техники, потому что её единицы растут и уменьшаются в десятки раз. Шаг перевода всегда — степень десяти: сто

сантиметров в метре, тысяча метров в километре. В традиционных единицах, которыми до сих пор пользуются в США, шаги неравномерны: двенадцать дюймов в футе, пять тысяч двести восемьдесят футов в миле.

Таблица книги даёт каждой приставке обозначение и значение. Кило, к, — это 10^3 , тысяча; так что $1 \text{ км} = 10^3 \text{ м}$, около шести десятых мили. Милли, м, — это 10^{-3} , тысячная; так что миллиметр — тысячная доля метра, примерно рост блохи в холке. Гига, Г, — это 10^9 ; гигагерц — типичная частота микроволн. Мега, М, — это 10^6 , а микро, мк, — 10^{-6} . Санти, с, — это 10^{-2} , так что сантиметр, примерно толщина кончика пальца, — сотая доля метра. На дальних концах экса, 10^{18} , даёт эксаметр — примерно путь света за столетие, а атто, 10^{-18} , даёт аттосекунду — примерно время, за которое свет пересекает атом. Посередине фемтометр, 10^{-15} м , — размер протона.

экса *E* 10^{18}

гига *G* 10^9

мега *M* 10^6

кило *k* 10^3

санти *c* 10^{-2}

милли *m* 10^{-3}

микро *μ* 10^{-6}

фемто *f* 10^{-15}

атто *a* 10^{-18}

Метрические приставки

Как приставка работает в вычислении? Словами: замените приставку её степенью десяти и умножьте. Для лекарства: 250 мг = 250×10^{-3} г = 0,250 г, четверть грамма. Для карты: 12 км = 12×10^3 м = 12 000 м. Иначе говоря, приставка — это просто сокращение для степени десяти, и её всегда можно раскрыть.

приставка $\rightarrow 10^n$

$$250 \text{ mg} = 250 \times 10^{-3} \text{ g} = 0.250 \text{ g}$$

$$12 \text{ km} = 12 \times 10^3 \text{ m} = 12\,000 \text{ m}$$

нм: оптика

м: стройка

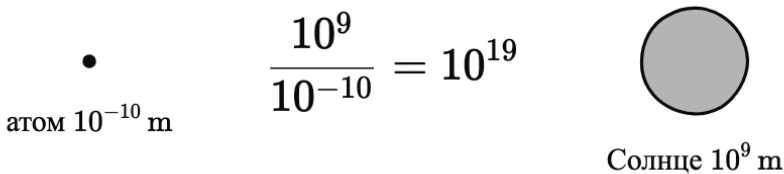
км: полёты

Раскрываем приставку

Большое преимущество в том, что одна единица служит в огромном диапазоне. Метры подходят для строительства, километры — для авиаперелётов, а нанометры, 10^{-9} м, — для конструирования оптических приборов. Не нужно изобретать новые единицы для каждой задачи.

Степени десяти измеряют и масштаб числа — его порядок величины. Любое число можно записать как число, умноженное на степень десяти. $800 = 8 \times 10^2$, а $450 = 4,5 \times 10^2$. У обоих множитель 10^2 , так что у них один порядок величины. Порядок величины — это прикидка: он говорит, на какой ступени лестницы десятков вы стоите, а не на какой точно перекладине.

$$\left. \begin{array}{l} 800 = 8 \times 10^2 \\ 450 = 4.5 \times 10^2 \end{array} \right\} \text{один} \\ \text{порядок}$$



Порядки величины

Теперь сравнение через всю лестницу. Атом имеет размер порядка 10^{-10} м, Солнце — порядка 10^9 м. Чтобы сравнить, разделим: $10^9 / 10^{-10} = 10^{19}$. Правило за этим такое: при делении степеней десяти их показатели вычитаются: девять минус минус десять — девятнадцать. Так что Солнце примерно на девятнадцать порядков шире атома — в десять миллионов миллионов миллионов раз.

Опыт

Возьмите линейку с миллиметрами и длинную рулетку. Измерьте ноготь большого пальца в миллиметрах, а длину комнаты — в метрах. Запишите обе величины в метрах как число, умноженное на степень десяти. Сосчитайте, на сколько степеней десяти они отстоят друг от друга: обычно на три или четыре.

Книга завершает раздел заметкой о будущем эталонов. Раз вещество построено из атомов, физикам больше всего хотелось бы единиц, основанных на крошечных неизменных вещах природы, таких как скорость света. Время уже там: секунда опирается на колебания атома цезия. Длина когда-то основывалась на длине волны света определённого атома, а теперь — на более точной скорости света. Если массу атомов или тщательно изготовленного кремниевого шара удастся измерять точнее эталона килограмма, за ними может последовать и масса. Электрический заряд, возможно, когда-нибудь будет основан на зарядах электронов и протонов, хотя пока ток и заряд привязаны к большим токам и силам между проводниками.

Запомним

Каждая метрическая приставка обозначает степень десяти: кило — десять в третьей, милли — десять в минус третьей, гига — десять в девятой. Чтобы воспользоваться приставкой, замените её степенью десяти: 250 мг — это 0,250 г, а 12 км — это 12 000 м. Порядок величины числа — это его степень десяти: 800 и 450 оба порядка десяти во второй степени. При делении степеней десяти показатели вычитаются, так что Солнце, десять в девятой степени метров, на девятнадцать порядков шире атома, десяти в минус десятой. Физики стремятся основать все единицы на крошечных неизменных вещах; секунда уже опирается на атом цезия.

Вопросы

1. Как пользоваться метрической приставкой в вычислении?
 - a. Прибавить степень десяти приставки к числу
 - b. Заменить приставку её степенью десяти и умножить
 - c. Разделить число на обозначение приставки
 - d. Не обращать внимания: приставки — просто названия
2. Почему у 800 и 450 один порядок величины?
 - a. У обоих множитель 10^2
 - b. Оба меньше 1000
 - c. Оба оканчиваются нулём
 - d. Оба делятся на 50

3. Какое правило даёт $10^9 / 10^{-10} = 10^{19}$?
- a. При делении степеней десяти показатели перемножаются
 - b. При делении степеней десяти складываются основания
 - c. При делении степеней десяти показатели вычитаются: $9 - (-10) = 19$
 - d. При делении степеней десяти всегда получается 10^1
4. В чём большое преимущество приставок для повседневной и научной работы?
- a. Они делают числа точнее
 - b. Они заменяют собой единицы
 - c. Они работают только для длин
 - d. Одна единица служит в огромном диапазоне, и новые единицы не нужны

Ответы

1. **b)** Приставка — сокращение для степени десяти: $250 \text{ мг} = 250 \times 10^{-3} \text{ г}$.
2. **a)** $800 = 8 \times 10^2$ и $450 = 4,5 \times 10^2$; общая степень десяти задаёт порядок величины.
3. **c)** При делении степеней десяти их показатели вычитаются.
4. **d)** Метры, километры и нанометры — одна единица с разными приставками, служащая строительству, авиационным полётам и оптике.

Разобранные примеры

Сравниваем атом с Солнцем Размер атома — около 10^{-10} м , Солнца — около 10^9 м . На сколько порядков они различаются?

Разделим большее на меньшее: $10^9 / 10^{-10}$.

При делении степеней десяти показатели вычитаются: $9 - (-10) = 19$.

Значит, отношение равно 10^{19} .

Ответ: 19 порядков величины

Задачи

1. Запишите 2,4 ГГц в герцах как степень десяти.

Подсказка: Гига — это 10^9 .

Ответ: $2,4 \times 10^9$ Гц; замените Г на 10^9 .

2. Запишите 0,075 м в миллиметрах, а 3500 м — в километрах.

Подсказка: 1 мм = 10^{-3} м, 1 км = 10^3 м.

Ответ: 75 мм и 3,5 км: $0,075 \div 10^{-3} = 75$, а $3500 \div 10^3 = 3,5$.

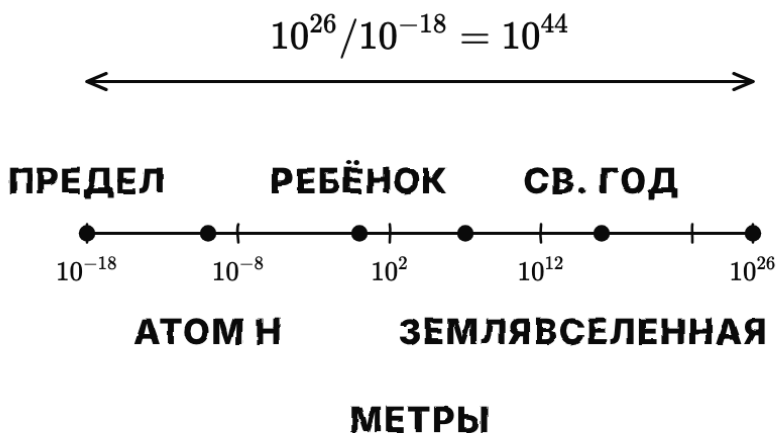
3. Размер вируса — около 10^{-7} м, рост человека — около 1 м (10^0 м). На сколько порядков они различаются?

Подсказка: Разделите и вычтите показатели.

Ответ: На 7: $10^0 / 10^{-7} = 10^7$, так как $0 - (-7) = 7$.

Размах природы и искусство перевода

Этот раздел открывают две фотографии. На первой среди ледяных кристаллов в антарктическом море плавают крошечный фитопланктон; его размеры — от нескольких микрометров, по 10^{-6} м, до примерно двух миллиметров в длину. На второй сталкиваются скопления галактик на расстоянии двух целых четырёх десятых миллиарда световых лет. Между пылинкой планктона и столкновением галактик лежит весь размах физики, и таблица длин, масс и времён из книги позволяет пройти по нему.



Сорок четыре порядка величины

Вот несколько шагов из этой таблицы, все в виде степеней десяти. Длина: наименьшая деталь, которую мы сейчас можем наблюдать, — 10^{-18} м; атом водорода — 10^{-10} м; четырёхлетний ребёнок — около 1 м; Земля — 10^7 м в поперечнике; световой год — 10^{16} м; край известной Вселенной — 10^{26} м. Масса: электрон — $9,11 \times 10^{-31}$ кг; комар — 10^{-5} кг; человек — 10^2 кг; Земля — $5,97 \times 10^{24}$ кг; Солнце — $1,99 \times 10^{30}$ кг. Время: одно колебание видимого света — 10^{-15} с; один удар сердца — около 1 с; одни сутки — $8,64 \times 10^4$ с; один год — $3,16 \times 10^7$ с; возраст Вселенной — около 10^{18} с. От наименьшей наблюдаемой длины до края Вселенной — $10^{26} / 10^{-18} = 10^{44}$: сорок четыре порядка величины. Иначе говоря, ни одна бытовая единица не

справилась бы со всем этим; нужны приставки и нужен надёжный способ переходить от одних единиц к другим.

Переходить от единицы к единице нужно и в повседневной жизни. Европейская кулинарная книга может указывать молоко в литрах, а ваш мерный кувшин размечен в чашках. Маршрут пешком может быть дан в футах, а вам нужны мили. Метод книги подходит для всего этого, и начинается он с простого случая: перевести 80 метров в километры.

$$80 \text{ m} \rightarrow \text{km}$$

$$\frac{1 \text{ km}}{1000 \text{ m}}$$

$$12 \text{ in} = 1 \text{ ft}$$

$$100 \text{ cm} = 1 \text{ m}$$

$$60 \text{ s} = 1 \text{ min}$$

$$80 \text{ m} \times \frac{1 \text{ km}}{1000 \text{ m}} = 0.080 \text{ km}$$

Переводим 80 м в км

Шаг первый: запишите единицу, которая у вас есть, — метры, и единицу, которая нужна, — километры. Шаг второй: найдите переводной множитель — отношение, показывающее, сколько

одних единиц равно другой. В футах 12 дюймов, в метре 100 сантиметров, в минуте 60 секунд, а в километре 1000 метров.

Шаг третий: умножьте то, что есть, на множитель, расположенный так, чтобы ненужная единица сократилась: $80 \text{ м} \times 1 \text{ км}/1000 \text{ м} = 0,080 \text{ км}$.

Рассмотрим каждую часть этой строки. В множителе $1 \text{ км}/1000 \text{ м}$ сверху и снизу одна и та же длина, так что он равен ровно единице. Умножение на единицу никогда не меняет количество, оно меняет только то, как количество записано. Метры в 80 м и метры под чертой сокращаются, как сокращается число, стоящее и над, и под дробной чертой, и остаются только километры. Остальное делают числа: 80 , делённое на 1000 , — это $0,080$. Такой способ, при котором единицы направляют и проверяют вычисление, называется анализом размерностей. Если единицы не сокращаются так, как нужно, множитель перевёрнут, и вы узнаете об ошибке ещё до конца вычисления.

$$\frac{1 \text{ km}}{1000 \text{ m}} = 1$$

$$80 \text{ m} \times \frac{1 \text{ km}}{1000 \text{ m}} = 0.080 \text{ km}$$

м сокращаются

АНАЛИЗ РАЗМЕРНОСТЕЙ

$$80 \text{ m} \times \frac{1000 \text{ m}}{1 \text{ km}} = 80\,000 \frac{\text{m}^2}{\text{km}} \quad \times$$

Множитель равен единице

Опыт

Напишите на бумаге: «80 м × 1 км / 1000 м». Зачеркните «м» над чертой и «м» под ней. Прочтите, что осталось: 80, умноженные на 1 км и делённые на 1000. Теперь попробуйте неправильно, с «1000 м / 1 км»: ничего не сокращается, и остаются квадратные метры на километр, а это явно не расстояние в километрах.

Тот же метод годится для любой пары единиц. Конвертер единиц в вашем телефоне работает ровно так: умножает на хранящееся

отношение, равное единице. За более полным списком множителей книга отсылает к своему приложению С.

С этими инструментами огромные числа таблицы перестают пугать. Приставки уменьшают их до удобных размеров, порядки величины позволяют сравнивать их с одного взгляда, а переводные множители — переходить от единицы к единице, не сбиваясь.

Запомним

Таблица книги простирается от наименьшей наблюдаемой детали, десяти в минус восемнадцатой степени метра, до края Вселенной, десяти в двадцать шестой степени метров: сорок четыре порядка величины. Переводной множитель — отношение равных количеств в разных единицах, например 1 км на 1000 м. Умножайте на множитель так, чтобы ненужная единица сократилась: $80 \text{ м} \times 1 \text{ км}/1000 \text{ м} = 0,080 \text{ км}$. Множитель равен единице, поэтому величина не меняется; меняется только её единица. Когда единицы сокращаются, направляя и проверяя вычисление, это называется анализом размерностей.

Вопросы

1. Почему множитель $1 \text{ км}/1000 \text{ м}$ не меняет переводимую длину?

- a. Потому что сверху и снизу в нём одна и та же длина, так что он равен единице
 - b. Потому что 1000 — круглое число
 - c. Потому что километры — основные единицы
 - d. Потому что он используется лишь раз
2. Что такое анализ размерностей?
- a. Измерение размеров предмета
 - b. Способ, при котором единицы направляют и проверяют вычисление
 - c. Округление до нужного числа цифр
 - d. Сравнение порядков величины
3. Если вы по ошибке умножите 80 м на 1000 м/1 км, что подскажет вам, что что-то не так?
- a. Ответ слишком мал
 - b. Ответ отрицателен
 - c. Единицы не сокращаются, и получаются квадратные метры на километр
 - d. В ответе слишком много цифр
4. Сколько порядков величины разделяют наименьшую наблюдаемую длину (10^{-18} м) и край Вселенной (10^{26} м)?
- a. 8
 - b. 18
 - c. 26
 - d. 44

Ответы

1. **a)** Сверху и снизу одна и та же длина, так что множитель равен единице; умножение на единицу меняет лишь то, как записано количество.
2. **b)** Когда единицы сокращаются, направляя и проверяя вычисление, это называется анализом размерностей.
3. **c)** Когда множитель перевёрнут, ничего не сокращается, и остаются единицы, явно не являющиеся километрами.
4. **d)** $10^{26} / 10^{-18} = 10^{44}$, так как $26 - (-18) = 44$.

Разобранные примеры

Метры в километры Переведите 80 м в километры.

У нас метры, а нужны километры.

Переводной множитель — $1 \text{ км}/1000 \text{ м}$.

$80 \text{ м} \times 1 \text{ км}/1000 \text{ м}$: метры сокращаются, остаются км.

$80 \div 1000 = 0,080$.

Ответ: 0,080 км

Задачи

1. Переведите 4,5 км в метры.

Подсказка: Умножьте на $1000 \text{ м}/1 \text{ км}$, чтобы км сократились.

Ответ: 4500 м: $4,5 \text{ км} \times 1000 \text{ м}/1 \text{ км}$.

2. Переведите 250 см в метры.

Подсказка: Воспользуйтесь множителем $1 \text{ м}/100 \text{ см}$.

Ответ: 2,5 м: $250 \text{ см} \times 1 \text{ м}/100 \text{ см}$.

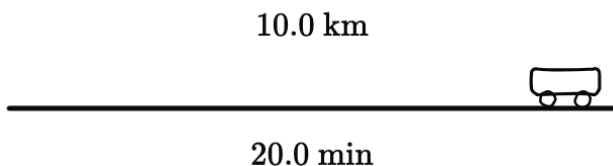
3. Одни сутки — это $8,64 \times 10^4 \text{ с}$. Сколько секунд в 10 сутках, в виде степени десяти?

Подсказка: Умножьте на 10 — это прибавит единицу к показателю.

Ответ: $8,64 \times 10^5$ с: $10 \times 8,64 \times 10^4$ с.

Короткая поездка домой

Вы проезжаете 10,0 км от школы до дома, и часы говорят, что поездка заняла 20,0 мин. Какой была ваша средняя скорость? Книга спрашивает о ней дважды: сначала в километрах в час, км/ч, а потом в метрах в секунду, м/с. План прост: вычислить скорость в данных единицах, затем перевести, умножив на множитель, который сокращает ненужную единицу и оставляет на её месте нужную.



$$v = \frac{d}{t} \quad \frac{10.0 \text{ km}}{20.0 \text{ min}} = 0.500 \frac{\text{km}}{\text{min}}$$

$$0.500 \frac{\text{km}}{\cancel{\text{min}}} \times \frac{60 \cancel{\text{min}}}{1 \text{ h}} = 30.0 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

Поездка домой: 30,0 км/ч

Шаг первый — определение: средняя скорость = расстояние/ время. Словами: сколько вы проехали, поделённое на время, которое это заняло. Шаг второй: подставим числа. средняя скорость = $10,0 \text{ км} / 20,0 \text{ мин} = 0,500 \text{ км/мин}$. Шаг третий: переведём минуты в часы. Множитель, который сокращает минуты и оставляет часы, — $60 \text{ мин}/1 \text{ ч}$. $0,500 \text{ км/мин} \times 60 \text{ мин}/\text{ч} = 30,0 \text{ км/ч}$. Минуты в знаменателе первой дроби сокращаются с минутами в числителе второй, и остаются километры в час.

Теперь проверки, на которых настаивает книга. Первая: правильно ли сократились единицы? Переверни вы множитель, получилось бы $\text{км/мин} \times 1 \text{ ч}/60 \text{ мин} = (1/60) \text{ км}\cdot\text{ч}/\text{мин}^2$: километро-часы на минуту в квадрате, а это явно не скорость в километрах в час. Вторая: та ли единица у ответа, о которой спрашивали? Да, километры в час. Третья: цифры. У $10,0$ и $20,0$ по три значащие цифры, так что у ответа $30,0$ их тоже три. Число 60 не в счёт, потому что час по определению равен ровно шестидесяти минутам; этот множитель абсолютно точен. Четвёртая: разумен ли ответ? Двадцать минут — треть часа, так что за целый час вы проехали бы трижды по десять километров, то есть тридцать. Тридцать километров в час — скорость, которую можно увидеть на спидометре на тихой городской улице, так что ответ проходит и проверку здравым смыслом.

Часть (б) спрашивает о метрах в секунду. Начнём с $30,0 \text{ км/ч}$; для этого нужны два множителя: один переводит часы в секунды, $1 \text{ ч}/3600 \text{ с}$, другой — километры в метры, $1000 \text{ м}/1 \text{ км}$. $30,0 \text{ км/ч} \times 1 \text{ ч}/3600 \text{ с} \times 1000 \text{ м}/1 \text{ км} = 8,33 \text{ м/с}$. Часы сокращаются с часами, километры с километрами, и остаются метры в секунду. Обычными числами: тридцать на тысячу — тридцать тысяч,

делённые на три тысячи шестьсот, — около восьми целых тридцати трёх сотых.

$$30.0 \text{ km/h} \rightarrow \text{m/s}$$

$$\frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \qquad \frac{1000 \text{ m}}{1 \text{ km}}$$

$$30.0 \frac{\cancel{\text{km}}}{\cancel{\text{h}}} \times \frac{1\cancel{\text{h}}}{3600 \text{ s}} \times \frac{1000 \text{ m}}{1\cancel{\text{km}}} = 8.33 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\frac{500 \text{ m}}{60 \text{ s}} \approx 8.33 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

ДРУГОЙ ПУТЬ

$$\text{ходьба: } 1.4 \text{ m/s} \approx 5 \text{ km/h}$$

От км/ч к м/с

Путь здесь не один. Начав с 0,500 км/мин, вы воспользовались бы другими множителями, шестьюдесятью секундами в минуте и тысячей метров в километре, но пришли бы к тем же 8,33 м/с. Проверьте: полкилометра — это пятьсот метров, а пятьсот, делённые на шестьдесят, — около восьми целых тридцати трёх сотых. Иначе говоря, пока все ненужные единицы сокращены, любой правильный путь ведёт к одному и тому же ответу.

Опыт

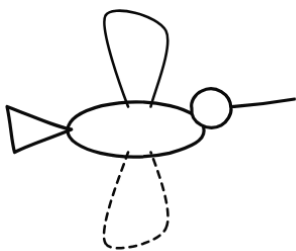
В следующий раз, когда пойдёте быстрым шагом, засекайте секундомером телефона время на отмеренной сотне метров. Если это займёт около семидесяти двух секунд, разделите сто на семьдесят два: около одной целой четырёх десятых метра в секунду. Затем переведите в километры в час: умножьте на три тысячи шестьсот секунд в часе и разделите на тысячу метров в километре. Должно получиться около пяти километров в час — обычный темп ходьбы.

Почему все ответы даны ровно с тремя цифрами? Почему не записать всё, что показывает калькулятор? Книга оставляет этот вопрос до раздела о правильности, точности и значащих цифрах.

Коротко о любопытных единицах. Многие единицы малоизвестны: фиркином, например, когда-то мерили пиво, и один фиркин — около тридцати четырёх литров. Книга предлагает поискать старинные меры и веса, например ячменное зерно, и выяснить, как каждая связана с единицами СИ.



1 фиркин ≈ 34 L



50 ВЗМ./С

$$1 \text{ ms} = 10^{-3} \text{ s}$$

$$\frac{1 \text{ s}}{50} = 0.02 \text{ s} = 20 \text{ ms}$$

Взмах крыла колибри

И наконец, выбор разумной единицы для быстрого события. Некоторые колибри взмахивают крыльями больше пятидесяти раз в секунду. Учёный, засекающий один взмах, пользуется основной единицей времени, секундой, но ему нужна её меньшая версия — миллисекунда, 10^{-3} с. В числах: $1 \text{ с} / 50 = 0,02 \text{ с} = 20 \text{ мс}$ на взмах.

Запомним

Средняя скорость — это расстояние, делённое на время: 10,0 км за 20,0 мин — это 0,500 км/мин. Умножение на 60 мин в часе сокращает минуты и даёт 30,0 км/ч; затем 1 ч на 3600 с и 1000 м на км дают 8,33 м/с. Проверяйте каждый перевод: единицы сокращаются, окончательная единица верна, значащие цифры соответствуют данным, ответ разумен. Точные множители, например шестьдесят минут в часе, не ограничивают значащие цифры. Для быстрых событий выбирайте малую единицу: взмах крыла колибри длится около двадцати миллисекунд.

Вопросы

1. Почему 60 мин/ч — верный множитель для перевода км/мин в км/ч?
 - a. Потому что он увеличивает число
 - b. Потому что его минуты сокращаются с минутами в км/мин и остаются км/ч
 - c. Потому что в минуте 60 секунд
 - d. Потому что у 60 три значащие цифры
2. Что показало бы, что вы записали множитель вверх ногами, как 1 ч/60 мин?
 - a. Единицы получаются км·ч/мин², а не км/ч
 - b. Ответ получается отрицательным

- c. В ответе слишком много цифр
 - d. Ответ ровно 30
3. Почему у ответа 30,0 км/ч три значащие цифры?
- a. Потому что у 60 две цифры
 - b. Потому что калькуляторы дают три цифры
 - c. Потому что у 10,0 и 20,0 по три, а точное число 60 их не ограничивает
 - d. Потому что скорости всегда дают с тремя цифрами
4. Какой ответ в м/с вы получите, если начнёте с 0,500 км/мин, а не с 30,0 км/ч?
- a. $8,33 \times 60$ м/с
 - b. 0,500 м/с
 - c. 30,0 м/с
 - d. Те же 8,33 м/с, другим путём

Ответы

1. **b)** Минуты в знаменателе км/мин сокращаются с минутами в числителе 60 мин/ч, и остаются километры в час.
2. **a)** Если множитель перевёрнут, ничего не сокращается и получаются километро-часы на минуту в квадрате, явно не скорость в км/ч.
3. **c)** У данных по три значащие цифры; число 60 точное, потому что час по определению равен шестидесяти минутам.
4. **d)** Пятьсот метров за шестьдесят секунд — около 8,33 м/с; любой правильный путь ведёт к одному результату.

Разобранные примеры

Короткая поездка домой Вы проезжаете 10,0 км за 20,0 мин. Найдите среднюю скорость в км/ч и в м/с.

Средняя скорость = расстояние/время = 10,0 км / 20,0 мин = 0,500 км/мин.

Умножим на 60 мин/ч: 0,500 км/мин $\times$ 60 мин/ч = 30,0 км/ч.

Умножим на 1 ч/3600 с и на 1000 м/1 км: $30,0 \times 1000 \div 3600 = 8,33$.

Проверка: единицы сокращаются, окончательные единицы верны, три значащие цифры, и 30 км/ч — разумная скорость.

Ответ: 30,0 км/ч и 8,33 м/с

Задачи

1. Бегун пробегает 1,50 км за 6,00 мин. Какова средняя скорость в км/ч?

Подсказка: Сначала найдите км/мин, затем умножьте на 60 мин/ч.

Ответ: 15,0 км/ч: $1,50 \div 6,00 = 0,250$ км/мин, а $0,250 \times 60 = 15,0$ км/ч.

2. Переведите 90,0 км/ч в м/с.

Подсказка: Умножьте на 1000 м/км и на 1 ч/3600 с.

Ответ: 25,0 м/с: $90,0 \times 1000 \div 3600 = 25,0$.

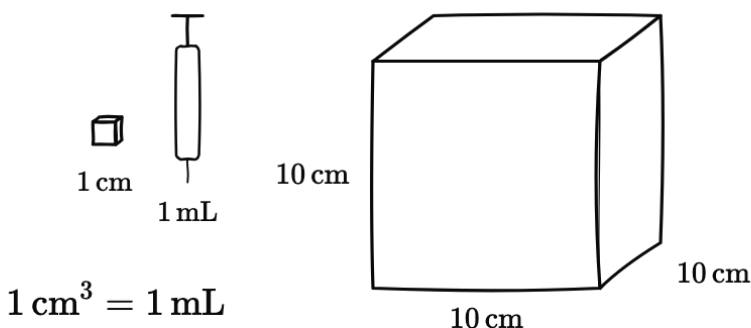
3. Муха взмахивает крыльями около 200 раз в секунду. Сколько миллисекунд длится один взмах?

Подсказка: Разделите одну секунду на 200, затем воспользуйтесь тем, что 1 с = 1000 мс.

Ответ: 5 мс: $1 \div 200 = 0,005$ с, то есть 5 мс.

Объём из длины и два вида «хорошо»

Наберите в маленький медицинский шприц ровно один миллилитр и выдавите его в полый пластиковый кубик со стороной один сантиметр. Он заполнит кубик ровно доверху. Это не совпадение, и книга использует его для быстрой проверки понимания.



$$(10 \text{ cm})^3 = 1000 \text{ cm}^3 = 1 \text{ L}$$

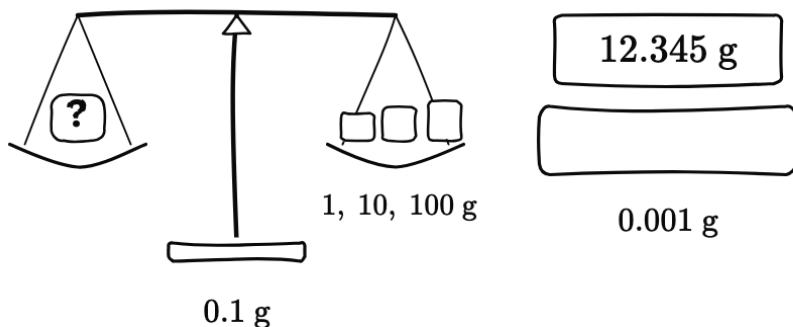
Литр — это куб со стороной 10 см

Факт такой: $1 \text{ cm}^3 = 1 \text{ мл}$. Что это говорит нам о метрических единицах? Что единица объёма, литр, построена из единицы длины, метра; величина миллилитра зависит от величины

сантиметра. Иначе говоря, объём — производная единица. Вот вычисление, которое за этим стоит. Объём куба со стороной десять сантиметров равен $(10\text{ см})^3 = 1000\text{ см}^3$, а это ровно один литр. Значит, $1\text{ л} = 1000\text{ см}^3$, и, разделив обе части на тысячу, получаем один миллилитр на кубический сантиметр. Мерный стаканчик, который прилагается к сиропу от кашля и размечен в миллилитрах, на самом деле отмеряет маленькие кубические сантиметры.

Теперь новый раздел: правильность, точность и значащие цифры. Он начинается с двух картинок взвешивания. Первая — двухчашечные весы: неизвестное тело лежит на одной чаше, а металлические гири в один грамм, десять граммов, сто граммов кладут на другую, пока коромысло между ними не встанет горизонтально, — это значит, что массы равны. Вторая — цифровые весы, сменившие многие такие весы. Механические весы могут показывать массу лишь с точностью до десятой доли грамма, а многие цифровые — до тысячной. Ваши кухонные весы, показывающие с точностью до грамма, намного уступают тем и другим в точности, но для муки их вполне хватает.

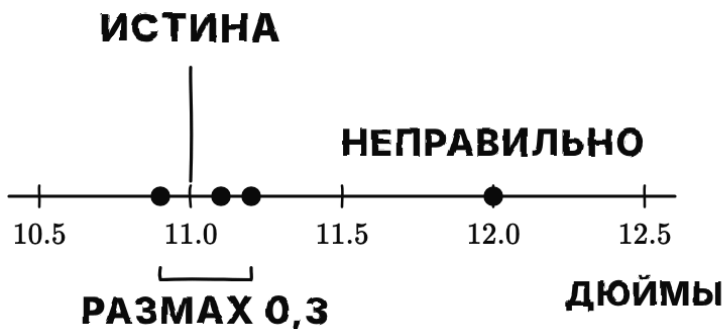
РАВНОВЕСИЕ



Весы и цифровые весы

Наука построена на наблюдении и эксперименте, а значит, на измерениях. Каждое измерение можно оценивать двумя разными способами.

Первый — правильность: насколько измерение близко к истинному значению. Возьмите лист стандартной бумаги для принтера, которая продаётся как имеющая длину 11,0 дюйма. Вы измеряете его три раза и получаете 11,1, 11,2 и 10,9 дюйма. Каждый отсчёт близок к истинным 11,0 дюйма, так что измерения довольно правильные. Отсчёт 12 дюймов был бы неправильным.



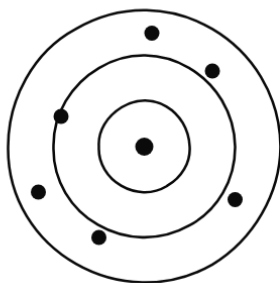
Правильно и точно

Второй — точность: насколько хорошо повторные измерения, сделанные в одинаковых условиях, согласуются друг с другом. Один из способов оценить точность — размах: $\text{размах} = \text{наибольшее} - \text{наименьшее}$. Для бумаги $\text{размах} = 11,2 \text{ дюйма} - 10,9 \text{ дюйма} = 0,3 \text{ дюйма}$. Отсчёты различаются самое большее на три десятых дюйма, так что они сравнительно точны. Если бы вы намерили 10,9, 11,1 и 11,9 дюйма, размах был бы $11,9 - 10,9 = 1,0$ дюйма, больше чем втрое шире, и измерения были бы не очень точными. Иначе говоря, правильность — про цель, точность — про разброс.

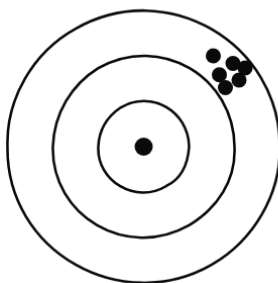
Опыт

Взвесьте одно и то же яблоко пять раз на кухонных весах, каждый раз снимая его и кладя обратно. Запишите каждый отсчёт и вычтите наименьший из наибольшего: этот размах и есть точность ваших весов для такой задачи. Если у вас есть вторые, лучшие весы, взвесьте яблоко и на них и посмотрите, насколько далеко от их показания ваше первое среднее: это грубая проверка правильности.

● = РЕСТОРАН



**ПРАВИЛЬНО,
НЕТОЧНО**



**ТОЧНО,
НЕПРАВИЛЬНО**

Две мишени GPS

Отсчёты с бумагой были и правильными, и точными. Но эти два качества могут расходиться, и книга показывает это на примере

спутниковой навигационной системы, разыскивающей ресторан. Представьте ресторан в центре мишени, а каждую попытку определить его положение — чёрной точкой. На первой картинке точки далеко разбросаны друг от друга, но их центр близок к ресторану. Это низкая точность при высокой правильности: каждое определение блуждает, но в среднем они указывают куда нужно. На второй картинке точки тесно сгруппированы, но далеко от ресторана. Это высокая точность при низкой правильности: система согласна сама с собой, но согласна насчёт неверного места. Это разница между точкой на карте в телефоне, которая дрожит вокруг вашего истинного положения, и точкой, которая спокойно стоит не на той стороне улицы.

Запомним

Один кубический сантиметр равен одному миллилитру, потому что литр произведён от метра: куб со стороной десять сантиметров вмещает ровно один литр.

Правильность — близость к истинному значению; точность — близость повторных измерений друг к другу. Размах, наибольшее минус наименьшее, — простая мера точности: для бумаги 11,2 минус 10,9 — это 0,3 дюйма. Измерения могут быть правильными, но неточными, как разбросанные вокруг цели точки, или точными, но неправильными, как тесная кучка в стороне от цели. Цифровые весы, показывающие с точностью до тысячной доли грамма, точнее весов, показывающих до десятой.

Вопросы

1. Почему один кубический сантиметр равен одному миллилитру?
 - a. Потому что обе единицы основные
 - b. Потому что литр произведён от метра: куб со стороной 10 см вмещает ровно 1 л
 - c. Потому что миллилитры измеряют шприцами
 - d. Потому что объём и длина — одна и та же величина
2. Каков размах для отсчётов бумаги 11,1, 11,2 и 10,9 дюйма?
 - a. 0,3 дюйма
 - b. 0,1 дюйма
 - c. 11,0 дюйма
 - d. 1,0 дюйма
3. Определения положения тесно сгруппировались, но далеко от ресторана. О чём это говорит?
 - a. Высокая правильность, низкая точность
 - b. Низкая правильность, низкая точность
 - c. Высокая точность, низкая правильность
 - d. Высокая правильность, высокая точность
4. Как оценить отсчёты 10,9, 11,1 и 11,9 дюйма для бумаги, продаваемой как 11,0 дюйма?
 - a. Очень точные, потому что один равен 10,9
 - b. Неправильные, потому что ни один не равен ровно 11,0

- с. Точные, потому что их среднее близко к 11
- д. Не очень точные, потому что их размах — 1,0 дюйма

Ответы

1. **б)** Куб со стороной 10 см вмещает 1000 см^3 , то есть 1 л, так что 1 мл — это 1 см^3 .
2. **а)** Размах = наибольшее – наименьшее = 11,2 дюйма – 10,9 дюйма = 0,3 дюйма.
3. **с)** Тесная кучка означает высокую точность; удалённость от цели — низкую правильность.
4. **д)** Размах в 1,0 дюйма означает, что отсчёты заметно меняются от одного к другому.

Разобранные примеры

От литров к кубическим сантиметрам Покажите, что 1 мл = 1 см^3 , исходя из куба со стороной 10 см, вмещающего 1 л.

Объём куба = $(10 \text{ см})^3 = 1000 \text{ см}^3$.

Этот куб вмещает 1 л, значит, $1 \text{ л} = 1000 \text{ см}^3$.

Миллилитр — тысячная доля литра: разделим обе части на 1000.

$1 \text{ мл} = 1 \text{ см}^3$.

Ответ: $1 \text{ мл} = 1 \text{ см}^3$

Задачи

1. Сколько миллилитров вмещает коробка $5,0 \text{ см} \times 4,0 \text{ см} \times 10,0 \text{ см}$?

Подсказка: Найдите её объём в кубических сантиметрах; каждый из них — один миллилитр.

Ответ: 200 мл: $5,0 \times 4,0 \times 10,0 = 200 \text{ см}^3 = 200 \text{ мл}$.

2. Четыре отсчёта длины карандаша: 17,6, 17,8, 17,5 и 17,7 см.
Каков размах?

Подсказка: Размах = наибольшее – наименьшее.

Ответ: 0,3 см: $17,8 - 17,5$.

3. Сколько кубических сантиметров в 2,5 л?

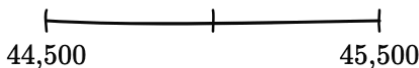
Подсказка: Воспользуйтесь тем, что $1 \text{ л} = 1000 \text{ см}^3$.

Ответ: 2500 см^3 : $2,5 \times 1000$.

Погрешность: честная оговорка

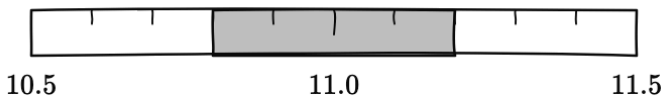
Спросите знакомого, сколько проехала его машина, и он может сказать: «Сорок пять тысяч миль, плюс-минус пятьсот». Это «плюс-минус» и есть то, что физики называют погрешностью.

$$\boxed{45,000} \pm 500 \text{ mi}$$



$$A \pm \delta A$$

$$11 \pm 0.2 \text{ in}$$



$$A \pm \delta A$$

И правильность, и точность влияют на погрешность измерения. Погрешность — мера того, насколько ваши измеренные значения могут отклоняться от эталонного или ожидаемого значения. Если измерения не очень правильны или точны, погрешность велика. Книга называет её оговоркой к вашим измеренным

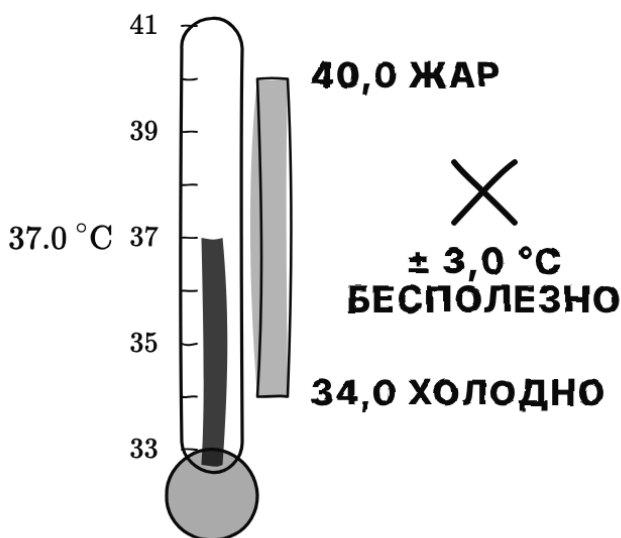
значениям. Для машины погрешность — пятьсот миль: истинный пробег может быть где угодно от $45\,000 - 500 = 44\,500$ до $45\,000 + 500 = 45\,500$ миль.

Запись короткая. Если измеренная величина — A , её погрешность записывают как δA , а результат — как $A \pm \delta A$. Словами: значение, а затем величина, на которую оно может отклоняться в любую сторону. Для листа бумаги из прошлой части — 11 дюймов $\pm 0,2$ дюйма, так что истинная длина лежит между 10,8 и 11,2 дюйма. Любое измерение несёт какую-то погрешность; вопрос лишь в том, какую.

Откуда она берётся? Книга называет четыре источника. Во-первых, ограничения измерительного прибора: наименьшее деление линейки может быть 0,1 дюйма. Во-вторых, умение человека: возможно, у него плохое зрение. В-третьих, неровности предмета: одна сторона листа может быть немного длиннее другой. В-четвёртых, всё остальное, что влияет на результат и зависит от ситуации. Честная погрешность должна основываться на тщательном обдумывании всего этого.

Почему это так важно? Жизненный пример в книге — больной ребёнок. Вы подозреваете жар и измеряете ребёнку температуру; термометр показывает $37,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, нормальную температуру тела. Теперь допустим, что погрешность термометра составляет $3,0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Тогда истинная температура лежит между $37,0 - 3,0 = 34,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ — переохлаждением — и $37,0 + 3,0 = 40,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ — опасно высоким жаром. Показание не говорит ничего из того, что вам нужно знать, так что термометр был бы бесполезен. Домашний термометр полезен лишь потому, что его погрешность намного меньше тех одного-двух градусов, что отделяют нормальную

температуру от жара. Иначе говоря, прибор хорош лишь тогда, когда его погрешность мала по сравнению с различиями, которые вам важны.



Бесполезный термометр

Запомним

Погрешность — то, насколько измерение может отклоняться от истинного или ожидаемого значения; её записывают как $A \pm \delta A$. Сорок пять тысяч миль плюс-минус пятьсот означает что угодно от сорока четырёх тысяч пятисот до сорока пяти тысяч пятисот. Она возникает из-за прибора, человека, предмета и других факторов. Термометр с погрешностью в три градуса превратил бы нормальное показание во что угодно — от переохлаждения до сильного жара, так что он был бы бесполезен.

Вопросы

1. О чём говорит запись результата как $A \pm \delta A$?
 - a. Что A измеряли дважды
 - b. О значении A и о том, насколько оно может отклоняться в любую сторону
 - c. Что A совершенно точно
 - d. Что δA — истинное значение
2. Термометр показывает $37,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ с погрешностью $3,0\text{ }^{\circ}\text{C}$. В каком диапазоне может лежать истинная температура?
 - a. От $34,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $40,0\text{ }^{\circ}\text{C}$
 - b. От $36,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $38,0\text{ }^{\circ}\text{C}$
 - c. От $37,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $40,0\text{ }^{\circ}\text{C}$
 - d. Ровно $37,0\text{ }^{\circ}\text{C}$

3. Когда, по словам лекции, прибор достаточно хорош для дела?
- a. Когда он даёт много цифр
 - b. Когда он цифровой
 - c. Когда его погрешность мала по сравнению с различиями, которые вам важны
 - d. Когда он дорогой
4. Плохое зрение человека, читающего линейку, — пример какого источника погрешности?
- a. Ограничений прибора
 - b. Неровностей предмета
 - c. Обстоятельств
 - d. Умения человека, выполняющего измерение

Ответы

1. **b)** Сначала идёт значение, затем величина, на которую оно может отклоняться в любую сторону.
2. **a)** $37,0 - 3,0 = 34,0$ и $37,0 + 3,0 = 40,0$ — от переохлаждения до опасного жара.
3. **c)** Термометр полезен, только если его погрешность намного меньше разрыва между нормальной температурой и жаром.
4. **d)** Книга называет умение человека, например его зрение, источником погрешности.

Разобранные примеры

Диапазон измерения с погрешностью Пробег машины — 45 000 миль $\pm$ 500 миль. Между какими значениями лежит

истинный пробег?

Измерение имеет вид $A \pm \delta A$ при $A = 45\,000$ и $\delta A = 500$.

Наименьшее: $A - \delta A = 45\,000 - 500 = 44\,500$.

Наибольшее: $A + \delta A = 45\,000 + 500 = 45\,500$.

Ответ: между 44 500 и 45 500 милями

Задачи

1. Длина листа бумаги — 11 дюймов $\pm 0,2$ дюйма. Между какими длинами она лежит?

Подсказка: Вычтите и прибавьте δA .

Ответ: Между 10,8 и 11,2 дюйма: $11 - 0,2$ и $11 + 0,2$.

2. Погрешность термометра $0,1\,^{\circ}\text{C}$, и он показывает $38,5\,^{\circ}\text{C}$. Можно ли сказать, что это выше нормальных $37,0\,^{\circ}\text{C}$?

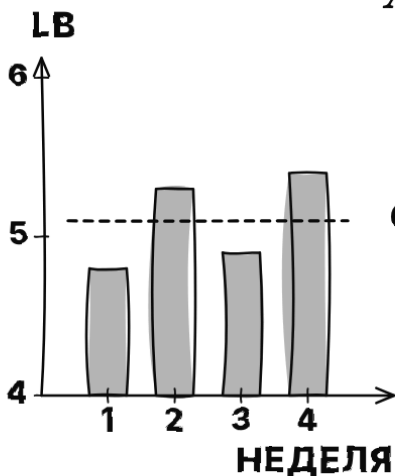
Подсказка: Найдите диапазон, в котором может лежать истинное значение.

Ответ: Да: истинное значение лежит между $38,4\,^{\circ}\text{C}$ и $38,6\,^{\circ}\text{C}$, гораздо выше $37,0\,^{\circ}\text{C}$, так что для этой цели прибор достаточно хорош.

Относительная погрешность

Погрешность в полфунта — это много или мало? Для мешка картошки это ничто, а для пакетика конфет — огромная величина. Чтобы судить о погрешности, её нужно сравнить с размером того, что измеряется. Такое сравнение и есть относительная погрешность.

$$\% \text{ погр} = \frac{\delta A}{A} \times 100\%$$



СРЕДНЕЕ 5,1

$$\frac{0.4}{5.1} \times 100\% = 8\%$$

$$5 \text{ lb} \pm 8\%$$

$$\frac{0.4}{2.55} \times 100\% \approx 16\%$$

Относительная погрешность пакета яблок

Книга определяет её так: $\% \text{ погр} = \delta A / A \times 100 \%$. Здесь A — измеренное значение, а δA — его погрешность. Словами: разделите погрешность на значение и умножьте на сто

процентов. Зачем делить? Потому что вопрос в том, какую долю измерения составляет погрешность: полфунта из пятидесяти — один процент, а полфунта из одного — пятьдесят процентов.

Пример из книги — пятифунтовый пакет яблок. Вы покупаете по пакету каждую неделю в течение четырёх недель и взвешиваете: 4,8, 5,3, 4,9 и 5,4 фунта. Из других измерений известно, что погрешность среднего веса — 0,4 фунта. Сначала среднее: $(4,8 + 5,3 + 4,9 + 5,4)/4 = 20,4/4 = 5,1$ фунта. Оно согласуется с указанными на этикетке 5 фунтами в пределах погрешности 0,4 фунта. Затем относительная погрешность: $\%погр = 0,4 \text{ фунта} / 5,1 \text{ фунта} \times 100 \% = 8 \%$. Фунты сокращаются, остаётся чистый процент. Итак, пакет весит 5 фунтов $\pm 8 \%$. На ваших кухонных весах восемь процентов пятифунтового пакета — это примерно одно небольшое яблоко.

Книга предлагает представить пакет вдвое легче с той же погрешностью 0,4 фунта. Тогда $0,4/2,55 \times 100 \% \approx 16 \%$, вдвое больше. Иначе говоря, одна и та же абсолютная ошибка весит вдвое больше для вдвое меньшего значения. И один практический совет: всегда умножайте дробь на сто процентов, иначе у вас останется десятичная дробь, а не процент.

Погрешность переходит и в вычисления. Всё, что вычислено из измеренных величин, тоже неточно: площадь пола, найденная по его длине и ширине, наследует их погрешности. Для умножения и деления, когда каждая погрешность мала — несколько процентов или меньше, — книга даёт правило: складывайте относительные погрешности. Для пола длиной 4,00 м с погрешностью 2 % и шириной 3,00 м с погрешностью 1 % площадь равна $12,0 \text{ м}^2$ с погрешностью $2 \% + 1 \% = 3 \%$. В

единицах площади три процента от 12,0 — это 0,36 м², округлённые до 0,4 м², потому что площадь дана с точностью до десятой доли квадратного метра.

умножить → сложите проценты



3.00 m $\pm$ 1%

4.00 m $\pm$ 2%

$$2\% + 1\% = 3\%$$
$$A = 12.0 \text{ m}^2 \pm 3\%$$
$$\pm 0.36 \rightarrow \pm 0.4 \text{ m}^2$$

Сложение процентов для пола

Наконец, погрешность решает, можно ли различить два измерения. Погрешность нового секундомера тренера — $\pm 0,05$ с. Лучший спринтер пробежал 100 м за 12,04 с на прошлой неделе и за 11,96 с на этой. Разница: $12,04 - 11,96 = 0,08$ с. Но истинное время прошлой недели могло быть всего 11,99 с, а этой — целых 12,01 с, так что два диапазона перекрываются. Вердикт книги: нельзя заключить, что на этой неделе он пробежал быстрее; секундомер слишком неточен, чтобы различить эти времена. По

той же причине дешёвые напольные весы не скажут вам, сбросили ли вы за ночь сто граммов.



$$12.04 - 11.96 = 0.08 \text{ s}$$

Быстрее или нет?

Запомним

Относительная погрешность — это погрешность, делённая на измеренное значение и умноженная на сто процентов. Пакеты со средним весом 5,1 фунта и погрешностью 0,4 фунта дают около восьми процентов; пакет вдвое легче дал бы около шестнадцати. При умножении или делении измерений с малыми погрешностями складывайте их относительные погрешности. У пола 4,00 на 3,00 м с погрешностями два и один процент площадь двенадцать квадратных метров, плюс-минус около нуля целых четырёх десятых. Два измерения можно различить, только если их разница больше, чем допускают их погрешности.

Вопросы

1. Почему погрешность в полфунта мала для мешка картошки, но велика для пакетика конфет?
 - a. Потому что картошка тяжелее, и та же ошибка составляет меньшую долю значения
 - b. Потому что конфеты взвешивают менее тщательно
 - c. Потому что относительная погрешность не учитывает вес
 - d. Потому что картошка — это фрукт
2. Почему в $\% \text{погр} = 0,4 \text{ фунта} / 5,1 \text{ фунта} \times 100 \%$ исчезают фунты?
 - a. Потому что фунты — не единицы СИ

- b. Потому что фунты в числителе и знаменателе сокращаются и остаётся чистый процент
 - c. Потому что ответ в килограммах
 - d. Потому что 0,4 — маленькое число
3. Погрешность длины пола — 2 %, ширины — 1 %. Какова относительная погрешность его площади?
- a. 1 %
 - b. 2 %
 - c. 3 %
 - d. $2 \% \times 1 \% = 2 \%$
4. Почему с секундомером $\pm 0,05$ с нельзя сказать, что 11,96 с быстрее, чем 12,04 с?
- a. Потому что 0,08 с — слишком много
 - b. Потому что спринтер устал
 - c. Потому что секундомеры всегда отстают
 - d. Потому что возможные диапазоны двух времён перекрываются

Ответы

1. a) Относительная погрешность делит погрешность на значение, так что та же ошибка составляет меньшую долю большего значения.
2. b) Деление фунтов на фунты даёт чистое число, выраженное в процентах.
3. c) При умножении с малыми погрешностями относительные погрешности складываются: $2 \% + 1 \% = 3 \%$.

4. d) Время прошлой недели могло быть всего 11,99 с, а этой — целых 12,01 с, так что различить их нельзя.

Разобранные примеры

Относительная погрешность пакета яблок Четыре пакета весят 4,8, 5,3, 4,9 и 5,4 фунта; погрешность среднего — 0,4 фунта. Найдите относительную погрешность.

Среднее: $(4,8 + 5,3 + 4,9 + 5,4)/4 = 20,4/4 = 5,1$ фунта.

Воспользуемся формулой $\% \text{погр} = \delta A/A \times 100 \%$.

$0,4 \text{ фунта} / 5,1 \text{ фунта} \approx 0,078$.

$\times 100 \% \approx 8 \%$.

Ответ: около 8 %

Задачи

1. Длина стержня — 2,00 м $\pm$ 0,04 м. Какова его относительная погрешность?

Подсказка: Разделите δA на A и умножьте на 100 %.

Ответ: 2 %: $0,04/2,00 = 0,02$, умножить на 100 % — 2 %.

2. Длина коробки 0,50 м (погрешность 4 %), ширина 0,20 м (погрешность 5 %). Какова относительная погрешность её площади?

Подсказка: Для произведения сложите относительные погрешности.

Ответ: 9 %: $4 \% + 5 \% = 9 \%$, при площади $0,10 \text{ м}^2 \pm$ примерно $0,009 \text{ м}^2$.

3. Два забега засекли как 10,50 с и 10,30 с секундомером с погрешностью $\pm 0,05$ с. Можно ли сказать, что второй был

быстрее?

Подсказка: Найдите диапазон каждого времени и проверьте, перекрываются ли они.

Ответ: Да: первое время лежит между 10,45 и 10,55 с, второе — между 10,25 и 10,35 с; диапазоны не перекрываются.

Значащие цифры и загадка нулей

Приложите палочку к линейке и посмотрите на её конец. Он находится где-то между отметкой 36,6 см и отметкой 36,7 см. Вы щуритесь, решаете, что ближе к 36,7, и записываете это. А можно ли записать 36,71 см?

Ответ книги начинается с инструмента. Точный измерительный инструмент — тот, что измеряет очень мелкими шагами.

Обычная линейка показывает с точностью до миллиметра, 0,1 см; штангенциркуль — раздвижной измеритель с тонкими губками — с точностью до 0,01 мм, в десять раз тоньше даже десятой доли миллиметра. Штангенциркуль — более точный инструмент, потому что замечает гораздо меньшие различия в длине. А чем точнее инструмент, тем точнее и правильнее могут быть измерения. Ваши кухонные весы с точностью до грамма и ювелирные весы с точностью до тысячной доли грамма различаются именно так.

Записывая измеренное значение, мы можем дать лишь столько цифр, сколько измерил инструмент. С линейкой 36,7 см — нормально, а 36,71 см — нет, потому что линейка не может измерить сотую долю сантиметра. Заметьте, что последняя цифра, семёрка, уже была оценкой: вы решали, ближе ли конец к 36,6 или к 36,7. Таково правило значащих цифр: последняя записанная цифра — первая цифра, в которой есть неопределённость. Чтобы сосчитать значащие цифры, начните с первой измеренной цифры слева и считайте до последней

записанной справа. Так что у 36,7 см три значащие цифры, и они говорят, насколько точен был инструмент.

С нулями нужна особая осторожность. В 0,053 нули лишь указывают положение запятой; они только занимают места, так что у 0,053 две значащие цифры. В 10,053 нули стоят между измеренными цифрами, поэтому считаются: пять значащих цифр. В 1300 нули неоднозначны: они могут означать, что число известно до последней единицы, а могут просто занимать места, так что значащих цифр может быть две, три или четыре. Стандартный вид решает вопрос: у $1,3 \times 10^3$ две значащие цифры, у $1,30 \times 10^3$ — три, а у $1,300 \times 10^3$ — четыре. Одной строкой: нули значащие, кроме случаев, когда они лишь занимают места.

	ЗНАЧ. ЦИФРЫ
0.0009	1
15,450.0	6
6×10^3	1
87.990	5
30.42	4

Какие нули считаются

Книга даёт пять чисел для проверки. У 0,0009 одна значащая цифра: нули лишь занимают места, отмечая положение запятой. У 15 450,0 — шесть: нули показывают, что измерение сделано до десятых, так что они считаются. У 6×10^3 — одна: степень десяти лишь задаёт положение запятой, это не измеренная цифра. У 87,990 — пять: последний нуль показывает измерение до тысячных. У 30,42 — четыре: нуль между значащими цифрами считается всегда.

Опыт

Возьмите линейку и измерьте ширину своего телефона. Запишите результат ровно с тем числом цифр, которое позволяет линейка, и закончите оценённой на глаз цифрой. Затем сосчитайте значащие цифры и спросите себя, позволил бы штангенциркуль добавить ещё одну.

Запомним

Точный инструмент измеряет мелкими шагами: линейка — до миллиметра, штангенциркуль — до сотой доли миллиметра. Записывайте лишь те цифры, что измерил инструмент; последняя из них — первая неопределённая. Считайте значащие цифры от первой измеренной до последней записанной: у 36,7 см их три. Нули, лишь указывающие положение запятой, не значащие; нули между цифрами или измеренные в конце — значащие. Стандартный вид устраняет неоднозначность: у $1,30 \times 10^3$ три значащие цифры.

Вопросы

1. Почему измерение линейкой нельзя записать как 36,71 см?
 - а. Потому что линейки неправильны

- b. Потому что линейка не может измерить сотую долю сантиметра
 - c. Потому что в 36,71 слишком мало цифр
 - d. Потому что палочка короче
2. Чем особенна последняя записанная цифра измерения?
- a. Она всегда ноль
 - b. Она списана с этикетки весов
 - c. Это первая цифра, в которой есть неопределённость
 - d. Она всегда точна
3. Как стандартный вид решает вопрос о числе значащих цифр в 1300?
- a. Запись $1,30 \times 10^3$ показывает ровно три значащие цифры
 - b. Он всегда даёт четыре
 - c. Он убирает все нули как бессмысленные
 - d. Он меняет значение числа
4. Почему у 30,42 четыре значащие цифры?
- a. Потому что это больше 30
 - b. Потому что ноль лишь занимает место
 - c. Потому что в числе есть запятая
 - d. Потому что ноль между значащими цифрами считается всегда

Ответы

1. b) Можно дать лишь столько цифр, сколько измерил инструмент, а линейка показывает до миллиметров.

2. **с)** Последняя записанная цифра — оценка, первая цифра с неопределённостью.
3. **а)** У $1,3 \times 10^3$ две, у $1,30 \times 10^3$ три, а у $1,300 \times 10^3$ четыре значащие цифры.
4. **д)** Нули, стоящие между значащими цифрами, сами значащие.

Разобранные примеры

Считаем значащие цифры Сколько значащих цифр в 0,0009, 15 450,0, 6×10^3 , 87,990 и 30,42?

0,0009: нули лишь указывают положение запятой, значит, 1.

15 450,0: нули показывают измерение до десятых, значит, 6.

6×10^3 : степень десяти лишь задаёт положение запятой, значит, 1.

87,990: последний нуль измерен, значит, 5; 30,42: нуль между цифрами считается, значит, 4.

Ответ: 1, 6, 1, 5 и 4

Задачи

1. Сколько значащих цифр в 0,00450, 2,050 и $7,0 \times 10^4$?

Подсказка: Начальные нули лишь занимают места; конечные нули после запятой измерены.

Ответ: 3, 4 и 2: в 0,00450 — 4, 5, 0; в 2,050 — все четыре цифры; в $7,0 \times 10^4$ — 7 и 0.

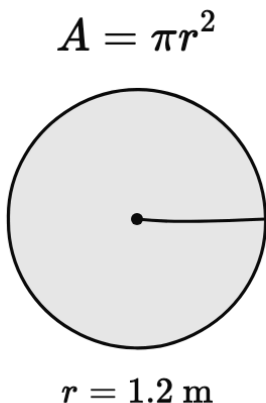
2. Запишите 52 000 в стандартном виде ровно с тремя значащими цифрами.

Подсказка: Перенесите запятую после первой цифры и оставьте три цифры.

Ответ: $5,20 \times 10^4$.

Значащие цифры в вычислениях

Измерьте радиус круглого стола — 1,2 м — и попросите калькулятор вычислить его площадь. Он покажет 4,5238934 м². Восемь цифр — от рулетки, которая дала вам две. Каким из них можно доверять?



4.5238934



$$A = 4.5 \text{ м}^2$$

2 ЗНАЧ. ЦИФРЫ

Округляем площадь круга

Принцип книги прост: когда объединяют измерения разной точности, в ответе не может быть больше значащих цифр, чем допускает наименее точное измерение. Правил два: одно для умножения и деления, другое для сложения и вычитания.

Правило первое, для умножения и деления: в результате остаётся столько значащих цифр, сколько у исходного значения с наименьшим их числом. Площадь круга $A = \pi r^2$: пи, умноженное на радиус и ещё раз на радиус. При $r = 1,2$ м калькулятор даёт $A = 3,1415927... \times (1,2 \text{ м})^2 = 4,5238934 \text{ м}^2$. У радиуса всего две значащие цифры, значит, и у площади их должно быть две: $A = 4,5 \text{ м}^2$. Неважно, что пи известно по меньшей мере до восьми цифр: слабое звено — радиус. Почему? Потому что радиус вполне мог бы быть 1,15 или 1,25 м, и тогда площадь лежала бы где-то между 4,2 и 4,9 квадратного метра; цифры после 4,5 — чистое украшение.

Правило второе, для сложения и вычитания: в ответе не может быть больше десятичных знаков, чем в наименее точном измерении. Пример книги следит за картошкой. Вы покупаете 7,56 кг в магазине на весах с точностью 0,01 кг. Вы оставляете 6,052 кг в лаборатории, взвесив на весах с точностью 0,001 кг. Дома вы добавляете 13,7 кг, взвешенные на напольных весах с точностью всего 0,1 кг. Итого: $7,56 - 6,052 + 13,7 = 15,208$ кг. Наименее точный отсчёт, 13,7 кг, идёт лишь до десятых, так что ответ округляется до десятых: 15,2 кг. Иначе говоря, сумма не тоньше самых грубых её весов. Это как прибавить ложку, взвешенную на ювелирных весах, к мешку, взвешенному на напольных: сумма известна лишь с шагом напольных весов.

КАРТОФЕЛЬ, КГ

$$\begin{array}{r} 7.56 \\ - 6.052 \\ + 13.7 \\ \hline 15.208 \end{array} \begin{array}{l} 0.01 \text{ kg} \\ 0.001 \text{ kg} \\ 0.1 \text{ kg} \\ \rightarrow 15.2 \text{ kg} \end{array}$$

Складываем картофель

Затем книга сообщает свои собственные соглашения.

Большинство чисел в тексте считаются имеющими три значащие цифры, и в разобранных примерах это выдерживается. Ответ с тремя цифрами опирается на данные, верные по меньшей мере до трёх цифр; если на входе цифр меньше, их меньше и на выходе. В некоторых темах, особенно в оптике, нужна большая точность, и используется больше трёх цифр. И точные числа результат не ограничивают: двойка в длине окружности $s = 2\pi r$ — ровно два, а не результат измерения.

Раздел завершают два упражнения. Первое: у женщины три сумки; две весят по 13,5 фунта, одна — 10,2 фунта. Итого: $2 \times 13,5 + 10,2 = 37,2$ фунта. Двойка — число сумок, точное число, так что

значащие цифры она не ограничивает. Второе: сила равна массе, умноженной на ускорение, $F = ma$. Тележка массой 55 кг разгоняется с ускорением $0,0255 \text{ м/с}^2$. $F = 55 \text{ кг} \times 0,0255 \text{ м/с}^2 = 1,4025 \text{ Н}$, и поскольку у 55 кг две значащие цифры, ответ — 1,4 Н.

Запомним

При умножении и делении сохраняйте столько значащих цифр, сколько у наименее точного исходного значения: радиус 1,2 м даёт площадь 4,5 квадратного метра. При сложении и вычитании сохраняйте столько десятичных знаков, сколько у наименее точного исходного значения: всего картошки — 15,2 кг. В этой книге обычно работают с тремя значащими цифрами. Точные числа, такие как 2 в 2лг или число сумок, никогда не ограничивают результат. На тележку массой 55 кг с ускорением $0,0255 \text{ м/с}^2$ действует сила 1,4 Н — две значащие цифры.

Вопросы

1. Почему площадь круга радиусом 1,2 м нужно записать как $4,5 \text{ м}^2$?
 - a. Потому что у π только две цифры
 - b. Потому что у радиуса две значащие цифры, а произведение сохраняет наименьшее их число
 - c. Потому что площади всегда округляют до десятых
 - d. Потому что калькулятор округляет

2. Почему итог по картошке округляется до 15,2 кг?
- a. Потому что наименее точный отсчёт, 13,7 кг, идёт лишь до десятых
 - b. Потому что у 15,208 слишком много цифр для суммы
 - c. Потому что килограммы нужно округлять до десятых
 - d. Потому что весы в магазине показывают до сотых
3. Почему двойка в $s = 2\pi$ не ограничивает значащие цифры?
- a. Потому что она маленькая
 - b. Потому что она чётная
 - c. Потому что она точная, а не результат измерения
 - d. Потому что она умножается на π
4. Тележка массой 55 кг разгоняется с ускорением 0,0255 м/с². Почему сила — 1,4 Н, а не 1,4025 Н?
- a. Потому что силу измеряют в целых ньютонах
 - b. Потому что в 0,0255 пять цифр
 - c. Потому что ускорение неточно
 - d. Потому что у 55 кг всего две значащие цифры

Ответы

1. **b)** При умножении в результате остаётся столько значащих цифр, сколько у наименее точного исходного значения — радиуса.
2. **a)** При сложении и вычитании в ответе не больше десятичных знаков, чем в наименее точном измерении.
3. **c)** Точные числа не ограничивают точность результата.
4. **d)** Произведение сохраняет столько значащих цифр, сколько у наименее точного исходного значения — 55 кг, у которого их две.

Разобранные примеры

Площадь круглого стола Радиус стола $r = 1,2$ м. Найдите его площадь $A = \pi r^2$ с правильным числом значащих цифр.

Калькулятор даёт $3,1415927... \times (1,2 \text{ м})^2 = 4,5238934 \text{ м}^2$.

При умножении сохраняем наименьшее число значащих цифр среди исходных значений.

У радиуса 1,2 м их две; у π гораздо больше.

Округляем до двух значащих цифр.

Ответ: $4,5 \text{ м}^2$

Задачи

1. Сложите 2,45 м, 0,3 м и 1,234 м и запишите результат с правильным числом десятичных знаков.

Подсказка: Сохраните столько десятичных знаков, сколько у наименее точного значения.

Ответ: 4,0 м: сумма 3,984 м, а 0,3 м дано лишь до десятых.

2. Масса ящика 4,0 кг, ускорение $1,25 \text{ м/с}^2$. Пользуясь $F = ma$, найдите силу с правильным числом значащих цифр.

Подсказка: Перемножьте, затем сохраните наименьшее число значащих цифр.

Ответ: 5,0 Н: $4,0 \times 1,25 = 5,0$, а у 4,0 кг две значащие цифры.

3. Радиус круга 2,00 м. Какова длина окружности $s = 2\pi r$ с правильным числом значащих цифр?

Подсказка: Двойка точная; у радиуса три значащие цифры.

Ответ: 12,6 м: $2 \times 3,14159 \times 2,00 = 12,566$, округлённые до трёх значащих цифр.

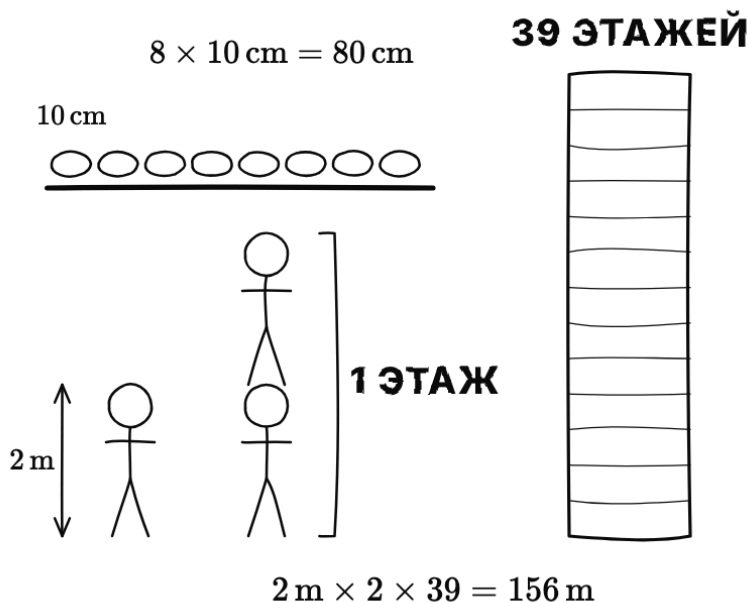
Прикидка: какой высоты триллион долларов?

В 2021 году государственный долг США составлял чуть больше двадцати восьми триллионов долларов. Можете ли вы представить себе хотя бы один триллион? Почти никто не может. Последний раздел главы показывает, как несколько грубых чисел, аккуратные единицы и готовность угадывать делают такую величину осязаемой.

Физикам, учёным и инженерам постоянно нужны приближённые оценки, или «прикидки». Как далеко находится некое место? Примерно какова плотность какого-то предмета? Примерно какой ток потечёт в цепи? Многие приближённые числа получаются из формул, исходные величины которых известны лишь с ограниченной точностью. Книга говорит, что этот навык растёт вместе с умением решать задачи: когда мыслишь числами, не боишься рисковать, набираешься опыта и хорошо чувствуешь единицы. Прикидки позволяют отбрасывать невозможные сценарии и нереальные числа, оспаривать чужие утверждения и выбирать собственный подход к задаче.

Первый пример: оцените высоту 39-этажного здания. Стратегия — масштабировать что-то знакомое, рост человека. Взрослый человек ростом около 2 м, а один этаж — примерно два взрослых роста. Значит, оценка такая: $2 \text{ м/человек} \times 2 \text{ человека/этаж} \times 39 \text{ этажей} = 156 \text{ м}$. Посмотрите на единицы: люди сокращаются с людьми, этажи с этажами, и остаются метры. Анализ

размерностей, с которым мы встречались при переводных множителях, так же хорошо работает и для прикидок.

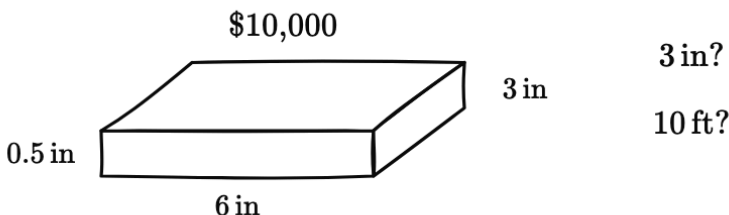


39-этажное здание в людях

Опыт

Один раз измерьте линейкой ширину своей ладони; допустим, это 10 см. Теперь прошагайте ладонью по столу, считая ладони. Если насчитали восемь, стол шириной около $8 \times 10 \text{ cm} = 80 \text{ cm}$. Затем спросите себя, как это делает книга, что ещё, кроме длины, можно оценить таким способом.

Теперь триллион долларов. Допустим, вам дали триллион долларов купюрами по 100 долларов, собранными в банковские пачки по сто купюр, каждая пачка стоит 10 000 долларов. Вы равномерно раскладываете пачки по полю для американского футбола, между зачётными зонами. Какой высоты будет груда? Один знакомый предполагает 3 дюйма, другой говорит — 10 футов. Книга работает здесь в дюймах и футах, потому что поля для американского футбола измеряют в ярдах.



$$6 \times 3 \times 0.5 = 9 \text{ in}^3$$

$$\frac{10^{12}}{10^4} = 10^8 \text{ пачек}$$

Триллион долларов в пачках

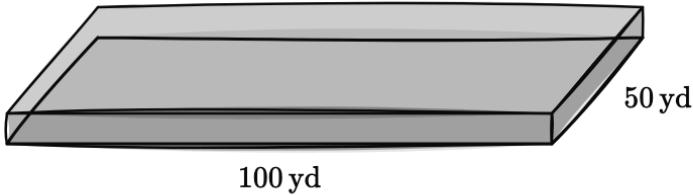
Стратегия: начать с того, что легко представить, — одной пачки; найти её объём; узнать, сколько пачек составляет триллион; затем распределить общий объём по площади поля и найти высоту.

Шаг первый: объём одной пачки. Купюра — примерно 3 на 6 дюймов, а пачка из ста купюр толщиной около 0,5 дюйма. объём пачки = 6 дюймов × 3 дюйма × 0,5 дюйма = 9 куб. дюймов. Это примерно размер толстого смартфона.

Шаг второй: число пачек. Триллион долларов — это 1×10^{12} долларов, а одна пачка — 1×10^4 долларов. 1×10^{12} долларов / 1×10^4 долларов на пачку = 1×10^8 пачек: сто миллионов пачек. При делении степеней десяти показатели вычитаются: двенадцать минус четыре, как мы видели с приставками.

Шаг третий: площадь поля в квадратных дюймах. Поле — 100 ярдов × 50 ярдов = 5000 кв. ярдов. Для перевода возьмём множители три фута в ярде и двенадцать дюймов в футе, каждый дважды, потому что у площади два измерения: 5000 кв. ярдов × 3 фута/ярд × 3 фута/ярд × 12 дюймов/фут × 12 дюймов/фут = 6 480 000 кв. дюймов. Для грубой оценки оставим одну значащую цифру: около 6×10^6 кв. дюймов.

$$V = 9 \times 10^8 \text{ in}^3$$



$$A \approx 6 \times 10^6 \text{ in}^2$$

$$h = \frac{9 \times 10^8}{6 \times 10^6} = 150 \text{ in} \qquad \approx 12 \text{ ft}$$

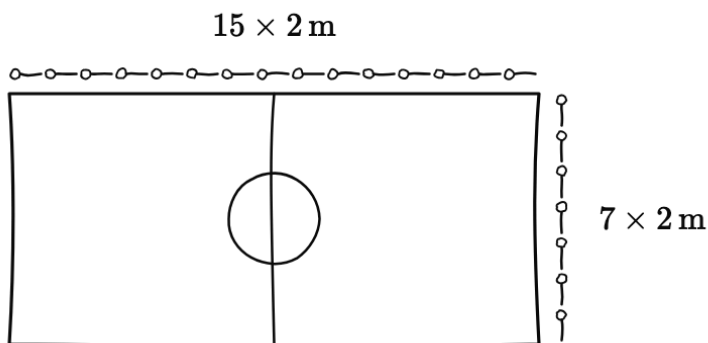
Какой высоты груда денег

Шаг четвёртый: общий объём: 9 куб. дюймов/пачка $\times 10^8$ пачек = 9×10^8 куб. дюймов.

Шаг пятый: высота. Объём равен площади, умноженной на высоту, значит, высота равна объёму, делённому на площадь. высота = 9×10^8 куб. дюймов / 6×10^6 кв. дюймов = $1,5 \times 10^2$ дюйма = 150 дюймов. Кубические дюймы, делённые на квадратные, дают дюймы — именно ту единицу, которая должна быть у высоты. В футах: 150 дюймов $\times 1$ фут/12 дюймов = 12,5 фута ≈ 12 футов. Представьте целое футбольное поле, покрытое деньгами, сложенными в полтора раза выше потолка вашей гостиной.

Так что догадка в 3 дюйма была слишком мала, а догадка в 10 футов, то есть 120 дюймов, оказалась примерно верной. Книга спрашивает, как с этим соотносится ваша собственная первая догадка и что это говорит о быстрых догадках по сравнению с тщательными прикидками. Иначе говоря, несколько честных шагов с единицами превращают дикую догадку в число, которое можно отстоять.

Последняя проверка понимания: оцените площадь стандартной баскетбольной площадки. В качестве линейки возьмите среднего мужчину ростом около 2 м. Примерно пятнадцать мужчин, уложенных один за другим, покроют длину, около $15 \times 2 \text{ м} = 30 \text{ м}$, а около семи — ширину, $7 \times 2 \text{ м} = 14 \text{ м}$. Площадь — около $30 \text{ м} \times 14 \text{ м} = 420 \text{ м}^2$.



$$30 \text{ m} \times 14 \text{ m} \approx 420 \text{ m}^2$$

Баскетбольная площадка в людях

На этом глава заканчивается: несколько объединяющих законов, общие единицы и эталоны, честная погрешность и, наконец, уверенность в том, что мир можно оценить в уме.

Запомним

Прикидки отбрасывают нереальные числа, проверяют утверждения и направляют решение задач. 39-этажное здание — это около 2 м на человека, умноженных на 2 человека на этаж и на 39 этажей, то есть около 156 м.

Триллион долларов купюрами по 100 долларов — это 10^8 пачек по 9 кубических дюймов, всего 9×10^8 кубических дюймов. Если разложить их по футбольному полю площадью около 6×10^6 квадратных дюймов, груда будет высотой около 150 дюймов, примерно 12 футов.

Баскетбольная площадка — это примерно 15 на 7 двухметровых человек, около 420 квадратных метров.

Вопросы

1. Почему в $2 \text{ м/человек} \times 2 \text{ человека/этаж} \times 39 \text{ этажей}$ ответ получается в метрах?
 - a. Потому что 39 — это счёт
 - b. Потому что люди и этажи сокращаются, и остаются метры
 - c. Потому что здания всегда измеряют в метрах
 - d. Потому что 156 — большое число
2. Почему деление 10^{12} на 10^4 даёт 10^8 ?
 - a. Потому что при делении степеней десяти показатели вычитаются: $12 - 4 = 8$

- b. Потому что 12, делённое на 4, — это 3
 - c. Потому что при делении степени десяти складываются
 - d. Потому что в пачке 10^8 долларов
3. Почему при переводе площади множители 3 фута/ярд и 12 дюймов/фут используются по два раза?
- a. Потому что поле длиной 100 ярдов
 - b. Потому что сохраняется одна значащая цифра
 - c. Потому что у площади два измерения, и каждый множитель длины входит дважды
 - d. Потому что дюймы меньше футов
4. Почему объём, делённый на площадь, даёт высоту в дюймах?
- a. Потому что поле измеряют в ярдах
 - b. Потому что пачки прямоугольные
 - c. Потому что сохраняется одна значащая цифра
 - d. Потому что кубические дюймы, делённые на квадратные, дают дюймы

Ответы

1. **b)** Люди сокращаются с людьми, этажи с этажами, и анализ размерностей оставляет метры.
2. **a)** При делении степеней десяти их показатели вычитаются, как мы видели с приставками.
3. **c)** Квадратные ярды нужно перевести и по длине, и по ширине, поэтому каждый множитель используется дважды.

4. d) Куб, дюймы / кв. дюймы = дюймы — именно та единица, которая должна быть у высоты.

Разобранные примеры

Триллион долларов на футбольном поле Триллион долларов купюрами по 100 долларов, в пачках $6 \times 3 \times 0,5$ дюйма стоимостью по 10 000 долларов, разложен по полю 100×50 ярдов. Какой высоты груды?

Одна пачка: $6 \times 3 \times 0,5 = 9$ куб. дюймов.

Пачек: $10^{12} / 10^4 = 10^8$, так что общий объём 9×10^8 куб. дюймов.

Поле: $5000 \text{ кв. ярдов} \times (3 \text{ фута/ярд})^2 \times (12 \text{ дюймов/фут})^2 = 6\,480\,000 \text{ кв. дюймов} \approx 6 \times 10^6 \text{ кв. дюймов}$.

Высота = $9 \times 10^8 / 6 \times 10^6 = 1,5 \times 10^2$ дюйма = 150 дюймов, около 12 футов.

Ответ: около 150 дюймов, примерно 12 футов

Задачи

1. Оцените высоту 25-этажного здания, считая 2 м на человека и 2 человека на этаж.

Подсказка: Перемножьте множители так, чтобы люди и этажи сократились.

Ответ: 100 м: $2 \text{ м/человек} \times 2 \text{ человека/этаж} \times 25 \text{ этажей}$.

2. Сколько квадратных дюймов в одном квадратном ярде?

Подсказка: Используйте 3 фута/ярд и 12 дюймов/фут, каждый дважды.

Ответ: 1296 кв. дюймов: $3 \times 3 \times 12 \times 12$.

3. Миллиард долларов (10^9) в таких же банковских пачках: сколько это пачек и какой объём?

Подсказка: Разделите на 10^4 долларов на пачку, затем умножьте на 9 куб. дюймов на пачку.

Ответ: 10^5 пачек, сто тысяч, объёмом 9×10^5 куб. дюймов.