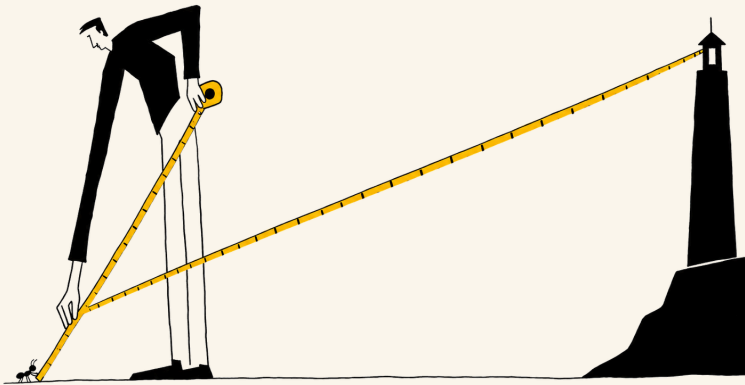


# Физика для колледжа



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](https://lecturized.com)

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

# Содержание

Несколько правил, на которых держится всё

Что охватывает физика

Модели, теории и законы

От натуральной философии к современной физике

Зачем нужны согласованные единицы

Килограмм и приставки

От протона до Вселенной — и обратно к метрам

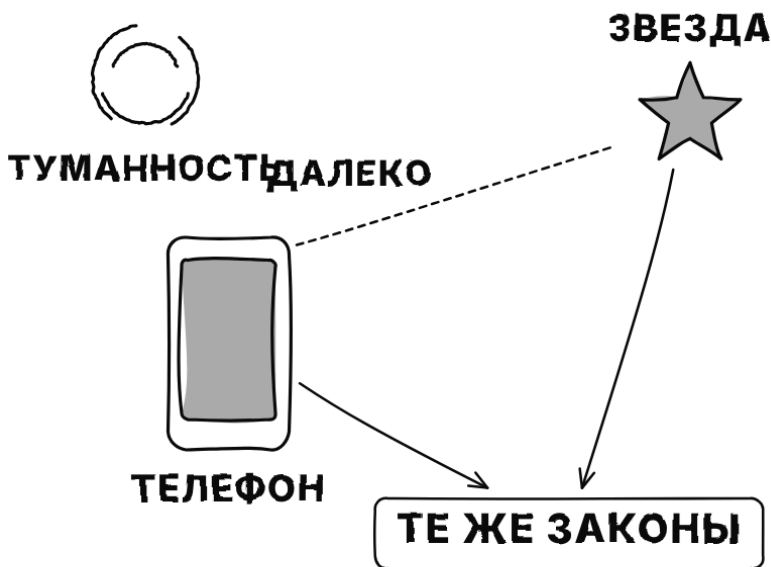
Точно, воспроизводимо и насколько уверенно

Насколько велико сомнение и сколько цифр

Честные ответы и хорошие прикидки

## **Несколько правил, на которых держится всё**

Сегодня вечером, если небо ясное, выйдите на улицу и найдите одну яркую звезду. Поднимите рядом с ней телефон, чтобы светящийся экран и далёкая точка света оказались в одном поле зрения. Кажется, что у них нет ничего общего: одно — пластинка стекла и металла у вас в руке, другое — раскалённый газовый шар, свет от которого идёт к нам дольше человеческой жизни. И всё же свет обоих рождается по одной и той же горстке правил — тех же, из-за которых закипает чайник и падает выроненный ключ. С этого удивления и начинается книга, и оно проходит главной нитью через всё, что дальше.

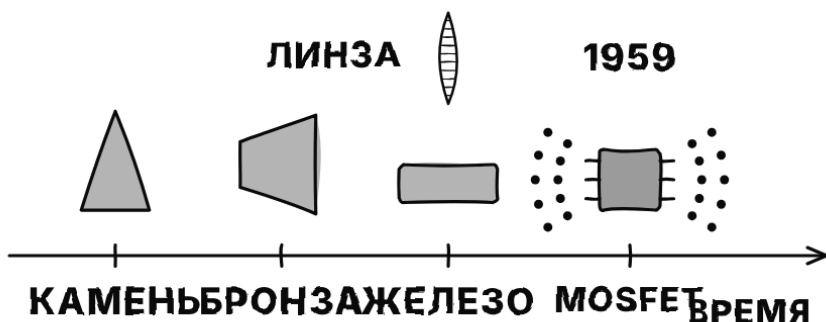


Телефон и звезда: одни правила

Первая картинка в книге — туманность Вуаль, огромное облако светящегося газа примерно в двух тысячах четырёхстах световых годах от Земли. Световой год — это расстояние, которое свет проходит за год, примерно девять с половиной триллионов километров, так что облако невообразимо далеко и невообразимо велико. Это остатки звезды, взорвавшейся около восьми тысяч лет назад, и её ударная волна до сих пор врзается в окружающий газ, вытягивая тонкие светящиеся нити и полотнища. Астрономы сравнивают новые снимки с теми, что телескоп «Хаббл» сделал в 1997 году, и по разнице узнают, как такие облака расползаются. Мысль книги проста: силы, действующие там, — те же самые, с которыми имеют дело инженеры, когда запускают ракету или отапливают дом. Её цвета

— привычное свечение водорода, серы и кислорода, тех же элементов, из которых состоит всё вокруг нас.

Дальше книга переходит от неба к истории людей. Каждая великая эпоха техники — каменный век, бронзовый век, железный век — определялась тем, что люди знали о материалах и как умели их обрабатывать. Как камень раскалывается в наконечник копья, как углерод, смешанный с железом в печах Южной Индии и Шри-Ланки, дал первую тонкую сталь, как отполированное стекло становится линзой, — всё это физика, освоенная руками задолго до того, как её записали. У нашей эпохи тоже есть свой герой — крошечный переключатель MOSFET, полевой транзистор, изобретённый в 1959 году в Нью-Джерси Мохамедом Аталлой, уроженцем Египта, и Давоном Кангом, уроженцем Кореи. Таких переключателей сделано больше, чем любых других предметов за всю историю человечества. Миллиарды их сидят внутри телефона, который вы только что поднимали к звезде, а другие управляют автомобилем и электроникой микроволновки.



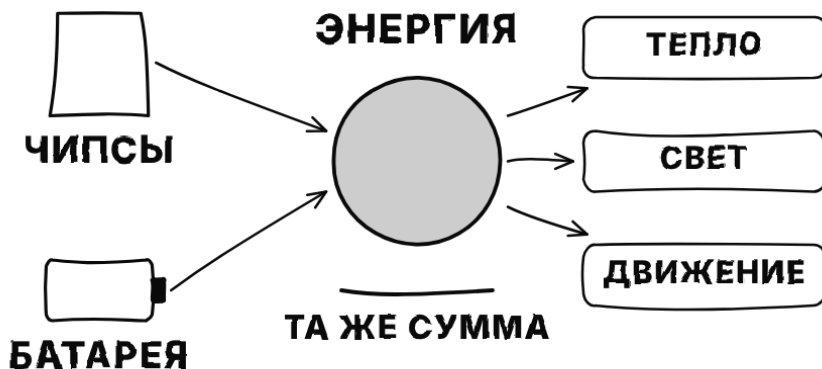
Эпохи, построенные на материалах

Физика живёт и внутри многих профессий, в названии которых этого слова нет. Пилот должен понимать, как ветер давит на самолёт и сбивает его с курса, а реабилитолог — какие силы действуют на мышцы, когда тело сгибается и движется.

Инженеры, электрики, врачи и программисты опираются на те же идеи каждый рабочий день. Книга добавляет новейшие чудеса из новостей — поезда, парящие над рельсами, плащи, огибающие светом самих себя, крошечных роботов, охотящихся на раковые клетки, — и говорит, что и они стоят на тех же принципах.

Вот суть дела. Мир невероятно разнообразен: птицы, летящие клином, цветы всех оттенков, молнии, тяготение, мельчайшие

частицы и крупнейшие скопления галактик. За века люди собрали горы фактов обо всём этом. И поразительное открытие в том, что удивительно небольшой набор законов объясняет то, что мы видим; природа оказывается упорядоченной и в глубине простой. Книга приводит один пример такого закона: энергия может менять форму, но никогда не пропадает. Пачка чипсов и автомобильный аккумулятор кажутся чужими друг другу, но оба хранят энергию, которую можно превратить в другие формы, и один и тот же закон связывает еду, аккумуляторы, тепло, свет и заведённую пружину. Калории, напечатанные на пачке, и заряд в аккумуляторе вашего телефона — две записи в одном и том же счёте. Иначе говоря, физика — не список фактов для зубрёжки, а короткий список правил, который позволяет связать вещи, казалось бы, не имеющие друг к другу никакого отношения.



Энергия меняет форму

Поэтому книга обещает больше, чем обзор тем. Умение применять несколько законов воспитывает способ мышления, аналитическую привычку, которая уходит далеко за пределы одной книги — в учёбу и в любую работу, которую вы выберете. Впереди — краткая история того, как натуральная философия выросла в физику, от древних мыслителей Ближнего Востока и Средиземноморья до Ньютона, а затем общая система единиц, благодаря которой учёные всего мира говорят на одном математическом языке. Последней идёт честная часть: насколько точным может быть измерение, насколько хорошо оно повторяется и почему учёные так тщательно говорят, чего именно они не знают. Подробности всего этого — от того, что

изучает физика, до того, чем различаются законы, теории и модели, — оставлены для следующих частей.

### **Запомним**

Природа безгранично разнообразна в мелочах, но небольшой набор физических законов объясняет очень многое. Одни и те же силы действуют в далёкой взорвавшейся звезде и на кухонном столе. Каждая эпоха техники, от каменных орудий до транзисторов в телефоне, выросла из знания о том, как ведут себя материалы. Закон о том, что энергия меняет форму, но не пропадает, связывает такие разные вещи, как еда, аккумуляторы и свет. Главное, чему учит физика, — способ мышления, который связывает, а не заучивает.

---

## **Вопросы**

1. Почему, наблюдая за облаком вроде туманности Вуаль, учёные могут узнать что-то полезное для Земли?
  - а. Потому что силы, формирующие облако, — те же, что действуют на Земле
  - б. Потому что облако достаточно близко, чтобы туда долететь и взять пробы
  - с. Потому что облако состоит из веществ, которых нет нигде на Земле

- d. Потому что у космоса свои правила, которые случайно похожи на наши
2. Что позволяет сделать закон, по которому энергия меняет форму, но никогда не пропадает?
- a. Считать еду, аккумуляторы и свет отдельными предметами с отдельными правилами
  - b. Связать такие разные вещи, как пачку чипсов и автомобильный аккумулятор
  - c. Хранить энергию вечно, никогда её не расходуя
  - d. Вообще ничего не измерять
3. Что, по словам книги, самое ценное даёт изучение физики?
- a. Длинный список фактов о природе для заучивания
  - b. Набор формул для занятий
  - c. Способ мышления, при котором несколько законов применяются далеко за пределами одной книги
  - d. Подробную историю каждого изобретения
4. Почему великие эпохи истории названы по материалам — камню, бронзе, железу?
- a. Потому что других материалов у людей вообще не было
  - b. Потому что историки выбрали названия наугад
  - c. Потому что каждый материал открыли за один год
  - d. Потому что каждая эпоха держалась на знании того, как ведёт себя материал и как его обрабатывать

## **Ответы**

1. **a)** Одни и те же силы действуют и там, и здесь — во взорвавшейся звезде и тогда, когда мы запускаем ракету или отапливаем дом.
2. **b)** И еда, и аккумулятор хранят энергию, которая может перейти в другие формы, и один закон связывает их.
3. **c)** Умение применять несколько законов воспитывает аналитическую привычку, которая пригодится в учёбе и в любой работе, которую вы выберете.
4. **d)** Каждую эпоху определяло то, что люди знали о материале и как умели его обрабатывать, а это знание и есть физика.

## Задачи

1. Книга говорит, что природа невероятно разнообразна, но небольшой набор законов объясняет многое в ней. Выберите две повседневные вещи, которые кажутся не связанными, и объясните с помощью закона сохранения энергии, что у них общего.

**Подсказка:** Спросите себя, где в каждой вещи хранится энергия и во что она может превратиться.

**Ответ:** Например, бутерброд и аккумулятор телефона: оба хранят энергию — бутерброд в виде калорий пищи, аккумулятор в виде электрического заряда. Закон о том, что энергия меняет форму, но не пропадает, говорит, что каждую из них можно превратить в другие формы, например в тепло или движение, так что одно и то же правило описывает обе вещи.

2. Объясните своими словами, почему книга выбрала героем информационной эпохи крошечный переключатель — MOSFET.

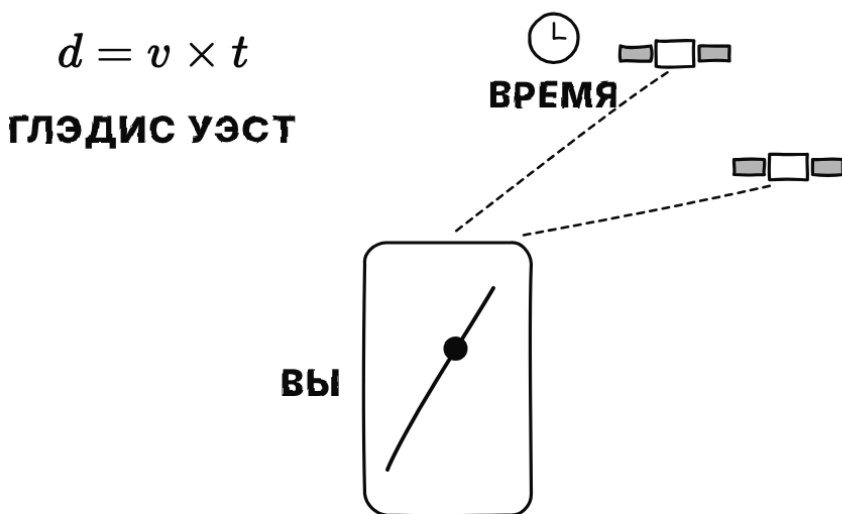
**Подсказка:** Подумайте, сколько их сделано и где они используются.

**Ответ:** Мало кто о нём слышал, но MOSFET сделано больше, чем любых других предметов в истории, и они стоят в компьютерах,

телефонах, автомобилях, микроволновках и медицинских приборах. Современная электроника построена на нём так же, как прежние эпохи — на камне, бронзе или железе.

# Что охватывает физика

Откройте карту в телефоне и посмотрите на маленькую синюю точку. Пройдите несколько шагов — и она идёт за вами, хотя ничто у вас в кармане не видит улицу. Как устройство узнаёт, где вы находитесь, с точностью до нескольких шагов? Ответ, говорит книга, — физика, и синяя точка хорошо показывает, что такое физика на самом деле.



Физика за синей точкой

Физика изучает, как вещество, энергия, пространство и время действуют друг на друга, и прежде всего — основные механизмы,

лежащие под каждым явлением природы. Это вся её область, и она огромна: от крошечных заряженных частиц до людей, машин и космических кораблей почти всё вокруг вас можно довольно точно описать её законами. Внутри смартфона физика описывает, как электричество движется по схемам, и это знание позволяет инженерам выбрать правильные материалы и компоновку. Карта в телефоне опирается на одно из простейших соотношений физики — связь между тем, какой путь что-то проходит, с какой скоростью и за какое время. Чтобы она работала, системе нужно учесть форму земли, точные расстояния до спутников над головой и даже тонкий эффект, из-за которого время там, наверху, идёт чуть иначе. Большая часть этих расчётов выросла из работ математика Глэдис Уэст, которая программировала первые компьютеры, способные с высокой точностью определять положение на Земле.

Чтобы пользоваться физикой, не нужно быть учёным. Она объясняет, как микроволновка греет еду и почему в неё никогда нельзя класть металл. Она объясняет, почему чёрный автомобильный радиатор помогает отводить тепло от двигателя и почему белая крыша сохраняет дом прохладнее. Она же помогает оценивать опасность излучения спокойно, а не со страхом. То же мышление объясняет зажигание в машине и электрические сигналы, которые бегут по вашим собственным нервам.

Физика — ещё и почва, на которой стоят другие науки. Химия имеет дело с атомами и молекулами, поэтому она коренится в физике атома; большая часть инженерного дела — это физика в работе; архитектуре она нужна для прочных зданий и для их акустики, отопления, освещения и охлаждения. Геологи с её

помощью определяют возраст горных пород и изучают землетрясения, а такие области, как биофизика и геофизика, наполовину физика по происхождению. В медицине она даёт нам рентген, магнитно-резонансную томографию, ультразвуковое измерение кровотока и лучевую терапию против рака. Книга отмечает здесь тихое родство: микроволновка и сканер мозга работают с волнами одного и того же рода, одна — чтобы греть еду, другой — чтобы найти опухоль.

Вывод книги таков: никому не нужно изучать каждое применение. Важно знать основные законы и уметь их применять. Иначе говоря, физика хранит самые основные части науки, поэтому ею пользуются все другие науки, и, изучив её, легче освоить их все. Подробности — как устроено каждое из этих устройств и как разворачиваются многочисленные примеры из биологии и измерительной техники — оставлены для остальной книги.

### **Запомним**

Физика изучает, как взаимодействуют вещество, энергия, пространство и время, и основные механизмы любого явления природы. Почти всё вокруг вас, от схем телефона до его карты, можно описать её законами. Вы пользуетесь ею, не будучи учёным: в микроволновке, белой крыше, автомобильном радиаторе. На ней стоят химия, инженерное дело, архитектура, геология и медицина. Важнее всего знать основные законы и уметь их применять, а не заучивать каждое применение.

---

## Вопросы

1. На какое физическое соотношение опирается карта в телефоне?
  - a. На связь между пройденным путём, скоростью и временем
  - b. На связь между цветом света и его температурой
  - c. На связь между весом телефона и его аккумулятором
  - d. На связь между размером экрана и его яркостью
2. Почему можно сказать, что химия коренится в физике?
  - a. Потому что химики пользуются той же лабораторной посудой
  - b. Потому что химия имеет дело с атомами и молекулами, которые описывает физика атома
  - c. Потому что химию придумали после физики
  - d. Потому что у физики и химии общие только единицы
3. Что общего у микроволновки и сканера мозга?
  - a. Обоими пользуются только в больницах
  - b. Оба работают, нагревая то, что внутри
  - c. Оба работают с волнами одного рода, применёнными по-разному
  - d. Оба изобрела Глэдис Уэст
4. Что, по словам книги, в физике важнее всего выучить?
  - a. Каждое её применение во всех подробностях
  - b. Историю каждого устройства

- c. Названия наук, которые ею пользуются
- d. Основные законы и умение их применять

## Ответы

- 1. **a)** Определение местоположения сводится к одному из простейших соотношений физики — между расстоянием, скоростью и временем.
- 2. **b)** Химия изучает, как взаимодействуют атомы и молекулы, а это опирается на физику атома.
- 3. **c)** Одна использует волны, чтобы греть еду, другой — чтобы получить изображение и найти опухоль.
- 4. **d)** Никому не нужно изучать каждое применение; важно знать основные законы и уметь их применять.

## Задачи

- 1. Книга говорит, что физика полезна, даже если вы не учёный. Выберите один из её бытовых примеров, например белую крышу или чёрный автомобильный радиатор, и объясните своими словами, на какой вопрос о нём отвечает физика.

**Подсказка:** Спросите себя, что происходит с теплом в каждом случае.

**Ответ:** Оба примера — о тепле. Физика объясняет, почему белая крыша помогает сохранять дом прохладным и почему чёрный радиатор помогает отводить тепло от двигателя: цвет поверхности влияет на то, как она обращается с теплом, и физика объясняет почему.

- 2. Назовите две области, кроме физики, которые, по словам книги, на неё опираются, и скажите, что физика даёт каждой из них.

**Подсказка:** Посмотрите на геологию, архитектуру или медицину.

**Ответ:** Например, геология с помощью физики определяет возраст горных пород и изучает землетрясения, а медицина использует её для рентгена, магнитно-резонансной томографии, ультразвукового измерения кровотока и лучевой терапии рака.

# Модели, теории и законы

Однажды утром вы поворачиваете ключ в машине, и ничего не происходит. Вы не просто смотрите на неё — вы начинаете гадать. Может быть, кончилось масло; вы открываете капот и проверяете щуп, а с маслом всё в порядке. Значит, догадка была неверной, и вы пробуете следующую. Сами того не заметив, вы только что применили метод, на котором держится вся наука.

Книга начинается с того, откуда берутся законы природы. Они встроены во Вселенную: люди их не создавали и не могут изменить, а могут только открыть и понять. То, что мы записываем как закон, — это человеческая формулировка правила, которому каждый природный процесс уже следует. Поиск этих правил — очень человеческое приключение, полное воображения, борьбы, побед и разочарований. Исаака Ньютона пришлось уговаривать опубликовать свой великий труд, а Мария Кюри оплачивала свои ранние исследования собственными деньгами и здоровьем и стала единственным человеком, получившим Нобелевские премии и по физике, и по химии. В основе всего лежит одно твёрдое правило игры: сначала наблюдение, и наука должна описывать мир таким, каков он есть, а не таким, каким нам хотелось бы его видеть.

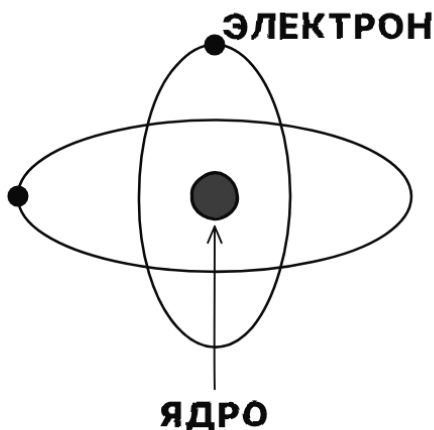
Начинается всё с обычного любопытства — например, с вопроса, означает ли определённый вид облаков дождь. Когда мы берёмся всерьёз, мы тщательно собираем и изучаем факты, измеряем точнее, где можно — ставим контролируемые опыты и ищем, как

факты складываются вместе. Из этой работы рождаются три вида обобщений: модели, теории и законы.

**МОДЕЛЬ**

**ТЕОРИЯ**

**ЗАКОН**



Модель атома

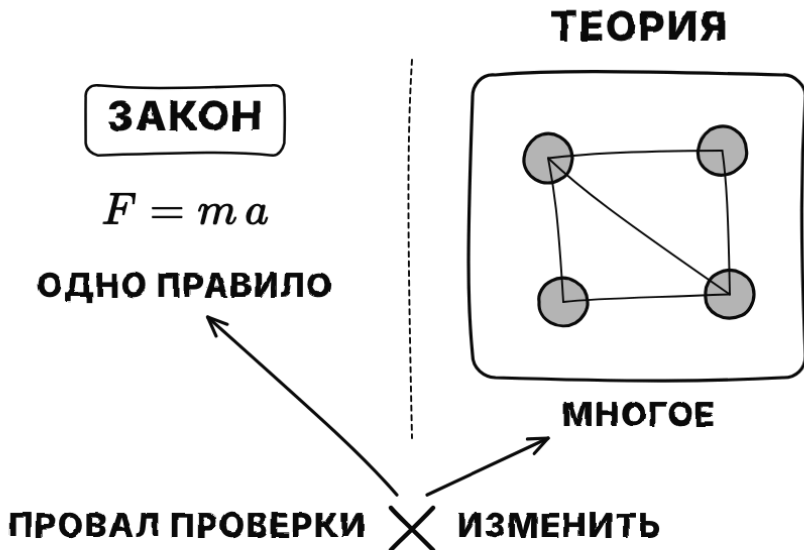
Модель — это образ того, что нельзя показать напрямую. Самая известная — атом, нарисованный как крошечная Солнечная система, где электроны кружат вокруг центра, как планеты вокруг Солнца. Никто не может увидеть, как вращается электрон, но эта картинка помогает объяснить то, что мы видеть можем, например особые цвета света, который испускает горячий газ. Модель опирается на факты, но работает только в определённых пределах; физики пользуются моделями, чтобы продумать ситуацию, сделать расчёт или построить компьютерную симуляцию. Прогноз погоды в вашем телефоне получен из такой

модели: компьютер представляет атмосферу, которую никто не может увидеть целиком, чтобы сказать, что она будет делать дальше.

Для учёного теория — не догадка, поэтому фраза «это всего лишь теория» звучит для него нелепо. Теория — это проверяемое объяснение закономерностей природы, подкреплённое фактами и много раз подтверждённое разными группами исследователей. Если модель описывает лишь некоторые черты предмета, то теория должна объяснять всё в своих пределах, и каждое её следствие, которое можно проверить, должно подтверждаться. Если опыт когда-нибудь покажет, что одно из этих следствий ложно, теорию либо отбрасывают, либо исправляют, например сужая круг случаев, которые она берётся описывать. Одним теориям нужен мысленный образ, другим нет: теории тяготения Ньютона он не нужен, ведь падающие и обращающиеся по орбитам тела мы видим прямо, а теория газов представляет газ как бесчисленные крошечные атомы и молекулы, слишком малые, чтобы их увидеть.

Закон — самое короткое из трёх: краткое, очень общее утверждение о закономерности природы, подкреплённое фактами и повторёнными опытами, часто записанное одним уравнением. Закон сохранения энергии в любом процессе — один из них; второй закон Ньютона, связывающий силу, массу и ускорение, — другой. Теория же слишком велика и богата, чтобы втиснуть её в одну строку, как теория эволюции или теория относительности. Проще говоря, закон описывает один вид действия, а теория объясняет целое семейство связанных явлений; закон стоит в начале научного рассуждения, теория — там, куда оно приходит. Более узкие правила, верные только в

особых условиях, обычно называют принципами, хотя границу между законами и принципами часто проводят небрежно.

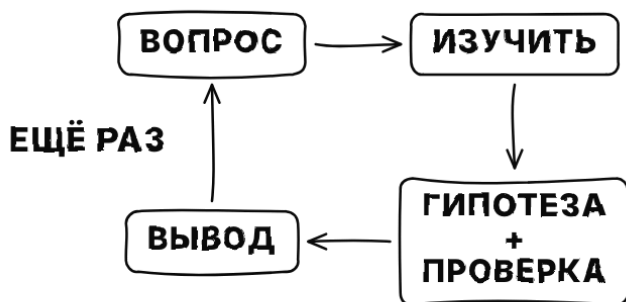


Закон и теория

Эти идеи делают больше, чем просто приводят в порядок старые факты. Часто модель, теория или закон указывают учёным на то, чего ещё никто не видел, и такие предсказания — среди величайших побед науки, возможных лишь потому, что Вселенная упорядочена. Но если опыт не подтверждает предсказание, теория или закон неверны, какими бы изящными или удобными они ни были. Ни один закон нельзя знать с абсолютной уверенностью, потому что никто не может поставить все возможные опыты; физики считают законы верными, пока

надёжный, повторяемый опыт им не противоречит, а тогда закон нужно изменить или отбросить.

У способа работы, стоящего за всем этим, долгая история. Тысячу лет назад в Каире Ибн аль-Хайсам, который сильно продвинул учение о свете и зрении, призывал учёных быть врагами всего прочитанного, доверять только объективным свидетельствам и проверять снова и снова, помня, что чувства и собственные ожидания могут нас обмануть. Его подход вёл к тому, что мы теперь называем научным методом: заметить что-то и задать вопрос, исследовать, предложить объяснение, проверить его опытом, затем изучить результат и сделать вывод. Именно это вы и сделали с машиной, которая не заводилась: гипотеза про масло не выдержала проверки, поэтому вы выдвинули новую и пошли на следующий круг. Метод работает далеко за пределами науки, и его можно подстроить под задачу. Здесь не рассказано, как эти идеи исторически выросли из натуральной философии в современную физику; эта история — дальше.



Метод как круг

## Запомним

Законы природы открывают, а не изобретают, и на первом месте — наблюдение мира таким, каков он есть. Модель — образ того, что нельзя увидеть напрямую, полезный только в определённых пределах. Теория — хорошо проверенное объяснение целого семейства явлений; закон — краткое общее утверждение об одной закономерности, часто одно уравнение. Любая теория и любой закон верны лишь до тех пор, пока надёжный опыт им не противоречит. Научный метод — наблюдай, предполагай, проверяй, делай вывод и пробуй снова — это то, что вы уже делаете, когда машина не заводится.

---

## Вопросы

1. Почему учёному кажется нелепой фраза «это всего лишь теория»?
  - a. Потому что учёные никогда не употребляют слово «теория»
  - b. Потому что для учёного теория — хорошо проверенное объяснение, а не догадка
  - c. Потому что любая теория уже является законом
  - d. Потому что теории нельзя проверить
2. Что происходит с хорошо установленным законом, если ему противоречит надёжный, повторяемый опыт?

- a. Закон нужно изменить или отбросить
  - b. Опыт не принимают во внимание, потому что закон старше
  - c. Закон превращается в модель
  - d. Ничего, потому что законы известны с абсолютной уверенностью
3. Почему атому нужна модель, а падающему яблоку — нет?
- a. Потому что яблоки не подчиняются физическим законам
  - b. Потому что атом не описывается никакой теорией
  - c. Потому что атом слишком мал, чтобы увидеть его напрямую, а за падающим телом можно наблюдать
  - d. Потому что модели применяют только к живым существам
4. В чём главное различие между законом и теорией?
- a. Закон — догадка, теория доказана
  - b. Закон старше любой теории
  - c. У теории всегда есть уравнение, у закона — никогда
  - d. Закон кратко формулирует одну закономерность; теория объясняет целое семейство связанных явлений

## Ответы

**1. b)** Теория — проверяемое объяснение закономерностей природы, подкреплённое фактами и много раз подтверждённое разными исследователями.

**2. a)** Ни один закон нельзя знать с абсолютной уверенностью; законы верны лишь до тех пор, пока надёжный опыт им не противоречит.

3. **с)** Модель изображает то, чего мы не видим; тяготению Ньютона образ не нужен, потому что сами тела можно наблюдать.
4. **д)** Закон описывает один вид действия, часто одним уравнением, а теория слишком богата, чтобы уместиться в одну строку.

## Разобранные примеры

**Машина, которая не заводится** Вы поворачиваете ключ, а машина не заводится. Пройдите по шагам научного метода, чтобы найти причину, проверив предположение, что в двигателе нет масла.

Наблюдение и вопрос: машина не заводится, значит, вопрос — почему.

Исследование: выясните, по каким разным причинам машина может не заводится.

Гипотеза: возможно, в двигателе нет масла.

Проверка: откройте капот и проверьте уровень масла; он в допустимых пределах.

Вывод: масло ни при чём, значит, нужно выдвинуть новую гипотезу и пройти круг снова.

**Ответ:** Проверка опровергает гипотезу про масло, и поиск продолжается с новой гипотезой.

## Задачи

1. Распределите по группам «модель», «теория» и «закон» и объясните почему: (а) энергия сохраняется в любом процессе; (b) атом, представленный как крошечная Солнечная система; (с) теория эволюции.

**Подсказка:** Спросите про каждое: это образ невидимого, краткое общее утверждение или большое объяснение множества связанных

явлений?

**Ответ:** (а) — закон: краткое, очень общее утверждение об одной закономерности. (b) — модель: образ того, что слишком мало, чтобы его увидеть, полезный в определённых пределах. (с) — теория: объяснение целого семейства явлений, слишком богатое, чтобы уместить его в одну строку.

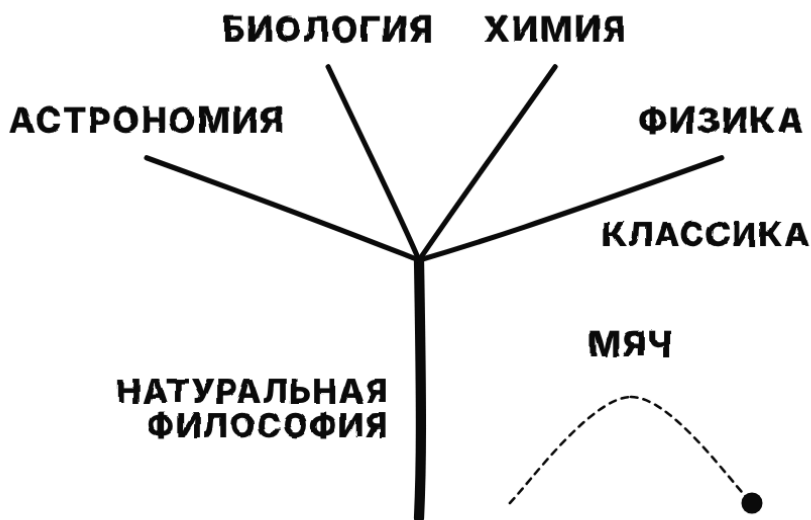
**2. Почему ни один закон физики нельзя знать с абсолютной уверенностью? Объясните в нескольких предложениях.**

**Подсказка:** Подумайте, сколько опытов понадобилось бы, чтобы проверить закон во всех возможных случаях.

**Ответ:** Чтобы быть совершенно уверенным, пришлось бы проверить закон во всех мыслимых ситуациях, а это невозможно. Поэтому физики считают закон верным, пока хороший, повторяемый опыт ему не противоречит, а тогда закон изменяют или отбрасывают.

# От натуральной философии к современной физике

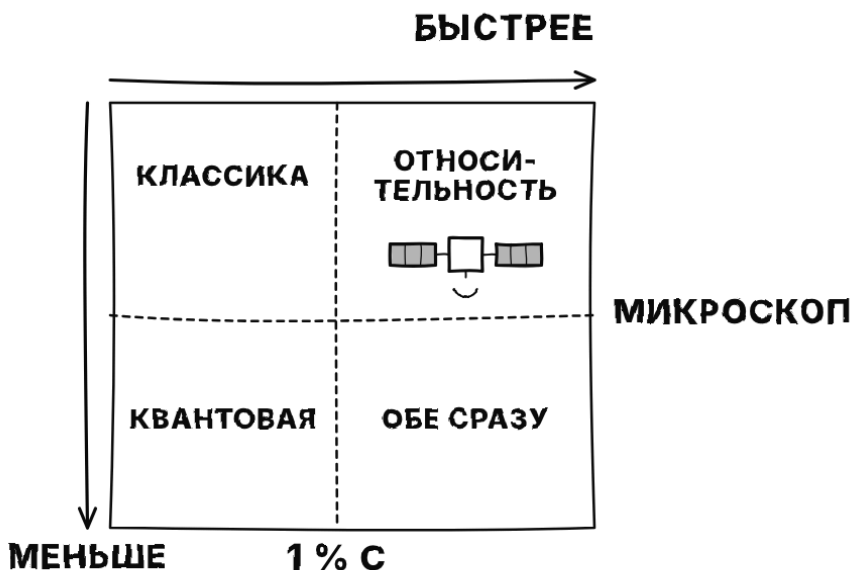
Бросьте мяч через комнату — и вы почти идеально предскажете его путь по правилам трёхсотлетней давности. Теперь спросите те же правила об электро́не в атоме или о космическом аппарате, мчащемся вблизи Солнца, и они начнут давать неверные ответы. Почему хорошие правила вдруг отказывают? Ответ даёт сама история физики.



Натуральная философия ветвится

Физика не всегда была отдельным предметом. Слово происходит от греческого слова «природа», и долгое время изучение природы называлось натуральной философией — одной широкой областью, объединявшей астрономию, биологию, химию, физику, математику и медицину. Аристотель писал сразу о физике, животных, душе, политике и поэзии. За последние несколько веков знания так разрослись, что натуральная философия распалась на отдельные отрасли, а физике досталась самая основная часть. Ибн аль-Хайсам и Галилей стояли на поворотных точках; гораздо позже Нильс Бор помог возвести одну из опор новой физики двадцатого века.

Физику от Возрождения до конца девятнадцатого века называют классической, а революционные открытия, начавшиеся около 1900 года, превратили её в современную физику. Классическая физика — не точное описание Вселенной, но отличное приближение при трёх условиях: тела движутся медленнее примерно одного процента скорости света, они достаточно велики, чтобы их можно было увидеть в микроскоп, и тяготение слабое, как земное. Поскольку мы живём именно в таких условиях, классическая физика кажется нам естественной, а многое в современной физике — странным. Поэтому модели так важны в современной физике: они позволяют представить то, чего мы никогда не испытываем, например очень быстрое движение или слишком малые для глаза предметы. Помогают и новые приборы: особый микроскоп теперь может показать отдельные атомы в листке золота.



Какая теория где

Современная физика стоит на двух революционных теориях. Теория относительности занимается очень быстрым и сильным тяготением, а квантовая механика — очень малым. Вместе они образуют релятивистскую квантовую механику, самую универсальную теорию из всех, что у нас есть, но она так требовательна к математике, что её используют, только когда ничто попроще не годится. Спутники, на которых держится карта в вашем телефоне, — настоящий случай, когда будничных правил не совсем хватает, поэтому системе приходится поправлять тот тонкий эффект со временем, о котором говорилось раньше.

Так почему же большая часть книги остаётся с классической физикой? По двум причинам: она прекрасно описывает повседневную жизнь, и без неё невозможно понять современную физику. Книга предлагает и быструю проверку прежних идей: если друг выучил новый закон, вы уже знаете, что это будет краткое утверждение о правиле, которому природа всегда следует; если это теория — что это будет широкое объяснение целого семейства явлений. Как физика измеряет — с её согласованными единицами и эталонами, — оставлено для следующих частей.

### **Запомним**

Физика выросла из натуральной философии — единого изучения природы, которое распалось на отдельные науки, а физике досталась самая основная часть. Классическая физика превосходно работает, пока тела медленные, достаточно крупные, чтобы видеть их в микроскоп, и тяготение слабое. За этими пределами нужна современная физика: теория относительности для очень быстрого и сильного тяготения, квантовая механика для очень малого. Классическая физика остаётся ядром книги, потому что прекрасно описывает повседневную жизнь, а современная физика построена на ней.

---

## **Вопросы**

1. Почему классическая физика кажется нам естественной, а современная часто — странной?
  - a. Потому что классическая физика точна, а современная — лишь догадка
  - b. Потому что мы живём там, где тела медленные, достаточно крупные, чтобы их видеть, и тяготение слабое, — именно там, где работает классическая физика
  - c. Потому что современную физику придумали философы, а не учёные
  - d. Потому что классическая физика новее и лучше проверена
2. Какую теорию нужно применять к космическому аппарату, который на большой скорости пролетает совсем близко от Солнца?
  - a. Теорию относительности — из-за сильного тяготения и большой скорости
  - b. Квантовую механику — потому что аппарат очень маленький
  - c. Классическую физику — потому что аппарат можно увидеть
  - d. Никакую — потому что ни одна теория не охватывает Солнце
3. Почему большая часть книги остаётся с классической физикой, хотя современная точнее?
  - a. Потому что современная физика опровергнута
  - b. Потому что современная физика — только про научную фантастику

- c. Потому что она прекрасно описывает повседневную жизнь, а без неё невозможно понять современную физику
  - d. Потому что релятивистская квантовая механика слишком нова, чтобы её преподавать
4. Что произошло с натуральной философией по мере роста знаний?
- a. От неё отказались и целиком заменили математикой
  - b. Она слилась с медициной в одну науку
  - c. Она осталась единой областью, которая по-прежнему охватывает всё
  - d. Она распалась на отдельные науки, а физике досталась самая основная часть

## Ответы

1. **b)** Классическая физика — отличное приближение как раз в условиях повседневной жизни, поэтому она совпадает с нашим опытом.
2. **a)** Теория относительности занимается очень быстрым движением и сильным тяготением, как вблизи Солнца.
3. **c)** Классическая физика точна в повседневных обстоятельствах, и её знание нужно, чтобы понять современную физику.
4. **d)** За последние несколько веков натуральная философия разветвилась на отдельные области, а физика сохранила самые основные стороны.

## Разобранные примеры

**Новый закон друга** Друг говорит, что узнал о новом законе природы. Что вы можете знать о нём ещё до того, как друг его опишет, и что было бы иначе, если бы он узнал о теории?

Вспомните, что такое любой закон: краткое утверждение о правиле, которому следуют все природные процессы.

Значит, даже без подробностей вы знаете, что закон друга будет кратким описанием того, как природа ведёт себя всегда.

Вспомните, что такое теория: широкое объяснение целого семейства связанных явлений.

Значит, если бы это была теория, вы ожидали бы масштабного, широко применимого объяснения, а не одного краткого правила.

**Ответ:** Закон будет сжатым утверждением о правиле, которому природа всегда следует; теория была бы широким объяснением целой группы связанных явлений.

## Задачи

**1.** Для каждого случая скажите, хватит ли классической физики или какая часть современной физики нужна, и почему: (а) мяч, брошенный через комнату; (б) электрон внутри атома; (с) тело, движущееся со скоростью в одну десятую скорости света.

**Подсказка:** Проверьте три условия: медленнее примерно одного процента скорости света, достаточно крупное, чтобы видеть в микроскоп, слабое тяготение.

**Ответ:** (а) Классической физики: мяч медленный, видимый и находится в слабом земном тяготении. (б) Квантовая механика: электрон слишком мал, чтобы увидеть его в микроскоп. (с) Теория относительности: одна десятая скорости света намного больше одного процента.

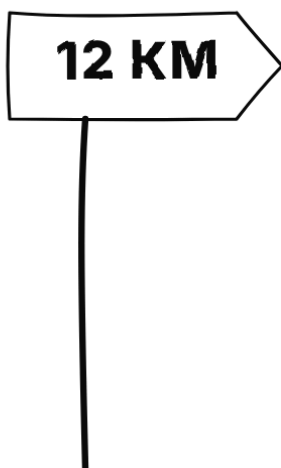
**2. Почему модели особенно полезны в современной физике? Объясните в нескольких предложениях.**

**Подсказка:** Подумайте, чем занимается современная физика и сталкиваемся ли мы с этим напрямую.

**Ответ:** Современная физика имеет дело с тем, чего мы не встречаем в повседневной жизни, например с очень быстрым движением или с предметами, слишком малыми, чтобы их увидеть. Модели позволяют представить это в человеческих образах — как когда мы воображаем атом, которого никогда не видели глазами.

# Зачем нужны согласованные единицы

Представьте дорожный указатель, на котором написано просто: «Город, 12». Двенадцать чего? Миль, километров, минут пешком? Без единицы число бесполезно, и книга даже показывает карикатуру ровно об этом. Эта часть о том, почему физика не может работать без единиц, о которых все договорились, и откуда берутся две самые основные из них.



**12 ШАГОВ**

**-**

**12 КВАРТАЛОВ**

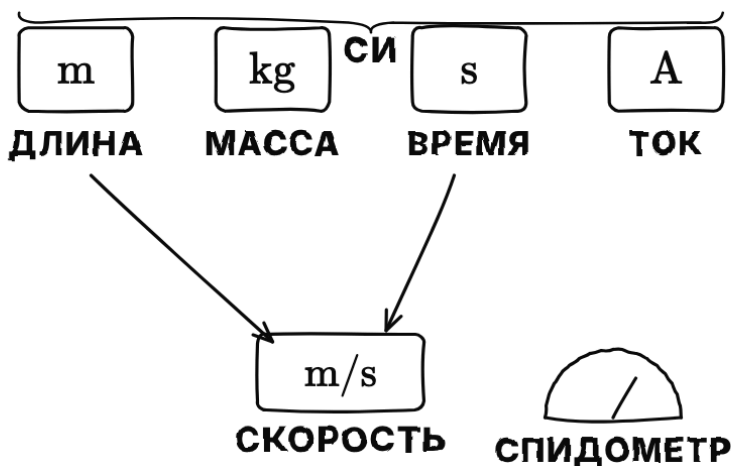
**—**

**12 МИЛЬ**

**—————**

Двенадцать чего?

Физика имеет дело с огромным разбросом размеров и времён: от мимолётной жизни атомного ядра до возраста Земли, от частиц меньше ядра до края известной Вселенной, от толчка прыгающей блохи до притяжения между Землёй и Солнцем. Выражая эти вещи числами, а не только описывая словами, мы понимаем природу гораздо глубже. Но числа что-то значат, только если они сопровождаются принятыми единицами. И здесь природа снова показывает свою простоту: почти любую величину в физике можно построить всего из четырёх основных — длины, массы, времени и силы электрического тока.



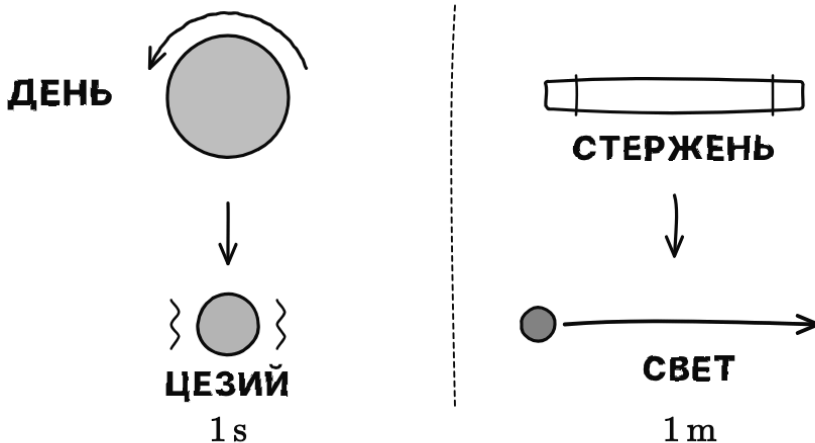
Четыре основные единицы, много производных

Физическую величину определяют одним из двух способов: либо говорят, как её измерить, как расстояние и время, либо говорят,

как её вычислить из других измерений, как среднюю скорость — пройденный путь, делённый на затраченное время. Каждое измерение затем выражают в единицах, стандартных количествах, например в метрах для спринта или в километрах для забега на длинную дистанцию. В мире используются две системы: международная метрическая система, называемая СИ, и более старые английские, или имперские, единицы, всё ещё распространённые в Соединённых Штатах. Почти все остальные страны и учёные во всём мире пользуются СИ. Четыре основные единицы СИ — метр для длины, килограмм для массы, секунда для времени и ампер для силы тока; любая другая единица — скорости, силы или электрического заряда — строится из них и называется производной.

Раньше секунда была долей средних суток, но вращение Земли медленно замедляется, сутки удлиняются и не годятся как постоянный эталон. С 1967 года секунду привязали к ровным колебаниям атомов цезия, которые отсчитывают атомные часы, уходящие меньше чем на миллионную долю секунды за год. Ваш телефон незаметно сверяет свои часы с сетями, которые, в свою очередь, опираются на такое атомное время. У метра похожая история: сначала доля расстояния от экватора до Северного полюса, потом промежуток между двумя метками на металлическом стержне, хранящемся под Парижем, потом число длин волн света, а с 1983 года — расстояние, которое свет проходит в вакууме за крошечную, строго заданную долю секунды. Этот последний выбор фиксирует скорость света как точное число метров в секунду.

## ЗАМЕДЛЕНИЕ



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

Секунда и метр стали точными

Зачем столько тщательности? Затем, что любое измерение в физике в конце концов выражается через эти основные единицы, и ни одно измерение не может быть точнее самих единиц. Килограмм, приставки, растягивающие единицы на многие степени десяти, и перевод из одной единицы в другую оставлены для следующих частей.

## Запомним

Число без согласованной единицы ничего не говорит. Почти вся физика построена из четырёх основных величин: длины, массы, времени и силы тока, которые измеряют в метрах, килограммах, секундах и амперах. Все остальные единицы производные от этих четырёх. Секунду теперь задают атомные часы, а метр — путь, который свет проходит за строго заданную долю секунды. Измерения никогда не бывают точнее основных единиц, на которых они стоят.

---

## Вопросы

1. Почему секунду перестали определять как долю средних суток?
  - a. Потому что сутки медленно удлиняются из-за замедления вращения Земли, а значит, это не постоянный эталон
  - b. Потому что в разных странах сутки разной длины
  - c. Потому что часы не могли отсчитать столько долей суток
  - d. Потому что оказалось, что сутки ровно на час короче, чем думали
2. Почему ни одно измерение не может быть точнее основных единиц?
  - a. Потому что основные единицы — лишь грубые прикидки

- b. Потому что любое измерение в конце концов выражается через эти единицы
  - c. Потому что измерительные приборы всегда неисправны
  - d. Потому что производные единицы точнее основных
3. Какая из этих единиц производная, а не основная?
- a. Метр
  - b. Секунда
  - c. Единица скорости
  - d. Ампер
4. На чём основан метр с 1983 года?
- a. На доле расстояния от экватора до Северного полюса
  - b. На промежутке между двумя метками на металлическом стержне под Парижем
  - c. На колебаниях атомов цезия
  - d. На расстоянии, которое свет проходит в вакууме за крошечную, строго заданную долю секунды

## Ответы

- 1. а)** Эталон не должен меняться, а солнечные сутки постепенно удлиняются, поэтому секунду привязали к ровным колебаниям цезия.
- 2. b)** Все измерения опираются на основные единицы, поэтому их точность задаёт предел для всего, что на них построено.
- 3. c)** Скорость строится из длины и времени, поэтому её единица производная; метр, секунда, килограмм и ампер — четыре основные единицы.

**4. d)** Метр теперь — расстояние, которое свет проходит в вакууме за  $1/299\,792\,458$  секунды, и это точно фиксирует скорость света.

## Разобранные примеры

### Сколько проходит свет за миллионную долю секунды

Метр определён так, что свет в вакууме проходит ровно 299 792 458 метров за одну секунду. Какое расстояние свет проходит за одну миллионную долю секунды?

Пройденный путь равен скорости, умноженной на время, как сказано в книге на рисунке о метре.

Скорость — 299 792 458 метров в секунду, время — одна миллионная доля секунды.

Умножение на одну миллионную сдвигает запятую на шесть знаков: 299 792 458 превращается в 299,792458.

Значит, расстояние — около 300 метров.

**Ответ:** Около 300 метров (299,79 метра).

## Задачи

**1.** Средняя скорость определяется как пройденный путь, делённый на время в пути. Бегун пробегает 10 километров за 50 минут. Какова его средняя скорость в километрах в минуту?

**Подсказка:** Разделите расстояние на время и не теряйте единицы.

**Ответ:** 0,2 километра в минуту: 10 километров, делённые на 50 минут.

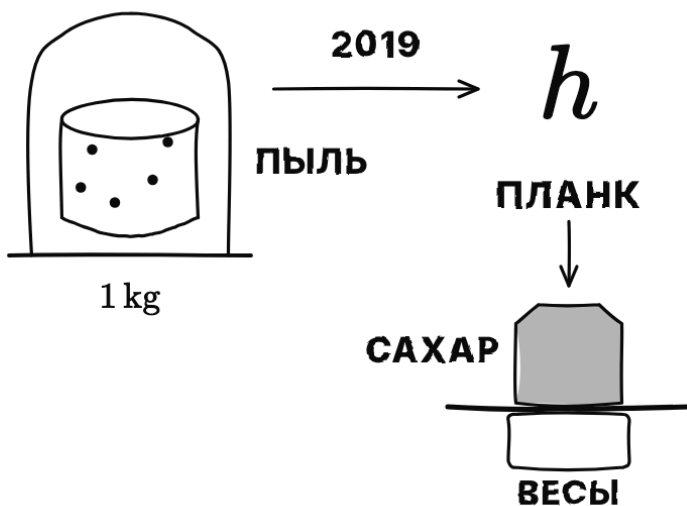
**2.** До 1967 года секунда составляла  $1/86\,400$  средних суток. Сколько секунд в сутках и почему разумно, что их именно столько? (В сутках 24 часа, в часе 60 минут.)

**Подсказка:** Сначала посчитайте секунды в одном часе.

**Ответ:** 86 400 секунд: в часе  $60 \times 60 = 3600$  секунд, а  $24 \times 3600 = 86\,400$ .

# Килограмм и приставки

Положите пакет сахара на кухонные весы — они покажут один килограмм. Но откуда весы знают, что такое килограмм? Где-то в конце длинной цепочки сравнений должен быть один главный килограмм, и больше века этим эталоном был маленький металлический цилиндр, хранившийся в сейфе под Парижем. Любые напольные весы и любые аптечные весы в конечном счёте сравнивались с этим единственным куском металла.



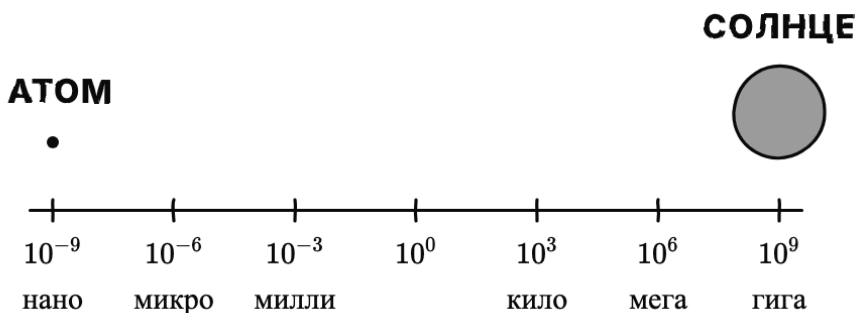
Килограмм покидает цилиндр

Цилиндр был сделан из платины и иридия и хранился вместе со старым эталоном метра в Международном бюро мер и весов, а его точные копии — в таких местах, как американский институт стандартов под Вашингтоном. Он не ржавел, но крошечные следы грязи из воздуха всё же оседали на его поверхности и за годы чуть-чуть меняли его массу. Эталон, который уплывает, — плохой эталон, поэтому в мае 2019 года учёные приняли новое, более устойчивое определение. Теперь килограмм определяют через секунду, метр и неизменную константу природы из квантовой физики — постоянную Планка, которая связывает энергию частицы света с её частотой.

За этим стоит более широкое стремление, о котором рассказывает книга. Физики хотели бы, чтобы каждая основная единица опиралась на мельчайшие кирпичики природы и на неизменные свойства Вселенной, например скорость света, а не на предметы в сейфе. Время уже опирается — на ровные колебания атомов цезия, а длина теперь держится на скорости света. Сила тока, четвёртая основная величина, появится в книге гораздо позже; первым главам о движении, жидкостях, теплоте и волнах нужны только длина, масса и время.

Вторая половина части — о большом удобстве метрической системы: её единицы шагают вверх и вниз в десять раз. В метре сто сантиметров, в километре тысяча метров, а в старой системе в футе двенадцать дюймов и в миле пять тысяч двести восемьдесят футов. Короткая приставка перед единицей сообщает множитель: кило — тысяча, милли — тысячная, микро — миллионная, нано — миллиардная и так далее, от таких громадин, как путь света за столетие, до времени, за которое свет пересекает атом. Так одна единица служит на любом масштабе:

метры в строительстве, километры в авиаперелётах, нанометры при расчёте линз, и новые единицы изобретать не нужно. Та же идея работает, когда память телефона считают в гигабайтах, а дозу лекарства — в миллиграммах.



Приставки вдоль степеней десяти

Мышление степенями десяти даёт и быстрый способ оценить величину — порядок величины, грубое чувство масштаба. Восемьсот и четыреста пятьдесят — разные числа, но оба — «сотни», поэтому у них один порядок величины. Атом имеет поперечник примерно в десятимиллиардную долю метра, а Солнце — примерно миллиард метров, и разрыв между этими порядками говорит больше любого длинного ряда цифр. Полная

таблица приставок и подробности перевода единиц оставлены для следующих частей.

### **Запомним**

Раньше килограммом был металлический цилиндр под Парижем, но грязь из воздуха медленно меняла его массу. С 2019 года килограмм определяют через секунду, метр и постоянную Планка — неизменное число природы. Физики хотят, чтобы каждая основная единица опиралась на мельчайшие части природы и на неизменные константы. Метрические единицы шагают в десять раз, а приставка вроде кило, милли или нано говорит, какой множитель. Порядок величины — быстрое, грубое ощущение того, насколько что-то велико.

---

## **Вопросы**

1. Почему старый металлический килограмм перестал быть эталоном?
  - a. Потому что его потеряли при переезде из Парижа
  - b. Потому что на нём оседали крошечные следы грязи из воздуха и медленно меняли его массу
  - c. Потому что он заржавел
  - d. Потому что он был слишком тяжёл, чтобы им пользоваться

2. Что делает перевод метрических единиц проще, чем в старой системе?
- a. Метрические единицы всегда меньше
  - b. У метрических единиц нет названий
  - c. Метрические единицы меняются только в десять раз
  - d. Метрическими единицами пользуются только учёные
3. Почему говорят, что у 800 и 450 один порядок величины?
- a. Потому что оба числа — сотни, одна и та же степень десяти
  - b. Потому что они отличаются меньше чем на десять
  - c. Потому что оба числа чётные
  - d. Потому что оба делятся на пятьдесят
4. На чём физики надеются основать каждую основную единицу?
- a. На предметах, хранящихся в сейфе под Парижем
  - b. На продолжительности суток
  - c. На размерах Земли
  - d. На мельчайших кирпичиках природы и её неизменных константах

## Ответы

1. **b)** Хотя он не ржавел, к его поверхности прилипала грязь из воздуха, эталон уплывал, и понадобилось более устойчивое определение.
2. **c)** Сто сантиметров составляют метр, а тысяча метров — километр, тогда как в старой системе в футе двенадцать дюймов, а в миле 5280 футов.

**3. а)** Порядок величины — это грубый масштаб, степень десяти, а оба числа — сотни.

**4. d)** Им нужны эталоны, опирающиеся на мельчайшие части природы и неизменные её свойства, например скорость света, как теперь время и длина.

## Разобранные примеры

**Один порядок величины** Покажите, что 800 и 450 одного порядка величины.

Порядок величины — это степень десяти, задающая масштаб числа.

800 — это 8 сотен, то есть  $8 \times 10^2$ .

450 — это 4,5 сотни, то есть  $4,5 \times 10^2$ .

У обоих одна и та же степень десяти — сотня, поэтому их общий порядок величины  $10^2$ .

**Ответ:** Оба порядка  $10^2$ , то есть сотни.

## Задачи

**1.** Сколько метров в 3 километрах и сколько дюймов в одной миле? Сравните, насколько легко сделать каждый перевод.

**Подсказка:** В километре 1000 метров; для мили возьмите 12 дюймов в футах и 5280 футов в миле.

**Ответ:** 3 километра — это 3000 метров, просто сдвиг на степень десяти. Одна миля — это  $12 \times 5280 = 63\,360$  дюймов, а тут нужно настоящее умножение. Вот почему метрические переводы проще.

**2.** Атом имеет поперечник около десятимиллиардной доли метра, а Солнце — около миллиарда метров. На сколько степеней десяти различаются эти порядки величины?

**Подсказка:** Запишите каждое число как степень десяти:

десятиллиардная — это десять в минус десятой, миллиард — десять в девятой.

**Ответ:** На девятнадцать степеней десяти: от десяти в минус десятой до десяти в девятой — это  $9 + 10 = 19$  шагов.

# От протона до Вселенной — и обратно к метрам

Положите на кончик пальца одну песчинку. Она около миллиметра в поперечнике, это тысячная доля метра. А теперь представьте протон, ядро атома водорода: он ещё в триллион раз меньше. И представьте край известной Вселенной, расстояние до которого в метрах записывается единицей с двадцатью шестью нулями. Мысль книги в этой части проста и головокружительна: физика должна говорить обо всём этом с помощью одного и того же небольшого набора единиц.

Чтобы дать почувствовать этот размах, книга приводит длинную таблицу известных длин, масс и времён, каждая из которых дана только своим порядком величины. Длины поднимаются от самой мелкой детали, которую видят опыты, через размер протона и атома, толщину клеточной мембраны, песчинку, маленького ребёнка, футбольное поле, самую глубокую впадину океана, Землю, расстояние до Солнца, световой год, нашу Галактику — и наконец до краёв известной Вселенной. Массы идут от электрона через атом водорода, бактерию, комара, колибри, литр воды примерно в один килограмм, человека, автомобиль, корабль, айсберг, Луну, Землю, Солнце, нашу Галактику — до всей известной Вселенной. Времена начинаются с мгновения, за которое свет пересекает протон, и идут через колебание световой волны, нервный импульс длиной около тысячной доли секунды, удар сердца около одной секунды, сутки, год, человеческую жизнь, записанную историю, возраст Земли и возраст Вселенной. Таблицу обрамляют две фотографии: крошечный морской

планктон среди кристаллов льда, длиной от нескольких микрометров до двух миллиметров, и две сталкивающиеся галактики на расстоянии больше двух миллиардов световых лет. Этот размах, говорит книга, бросает вызов воображению.

При таком множестве размеров нам постоянно приходится переходить от одной единицы к другой. Европейский рецепт даёт молоко в литрах, а вам нужны чашки; карта даёт прогулку в футах, а вам нужны мили; на упаковке лекарства доза в миллиграммах, а вы хотите знать, сколько это в граммах. Способ, которому учит книга, называется переводом единиц, и он держится на одной идее — переводном множителе. Переводной множитель — это просто отношение, показывающее, сколько одних единиц составляют другую: двенадцать дюймов в футе, сто сантиметров в метре, шестьдесят секунд в минуте, тысяча метров в километре. Вы записываете то, что у вас есть, умножаете на переводной множитель, расположенный так, чтобы ненужная единица сократилась, и остаётся нужная. Первый пример книги переводит восемьдесят метров в километры: метры сокращаются, и остаётся восемь сотых километра.

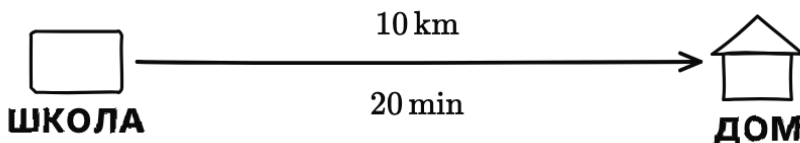
$$\frac{1 \text{ km}}{1000 \text{ m}}$$

**ПЕРЕВОДНОЙ МНОЖИТЕЛЬ**

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

Переводной множитель сокращает единицы

Затем она разбирает более полный пример — короткую поездку домой. Вы проезжаете десять километров от школы до дома за двадцать минут и хотите узнать свою среднюю скорость сначала в километрах в час, а потом в метрах в секунду. Разделив путь на время, получаем полкилометра в минуту, а раз в часе шестьдесят минут, это тридцать километров в час. Это такое же число, какое показывает спидометр машины, городская скорость, — хороший признак того, что ответ разумен. Чтобы перевести это в метры в секунду, нужны сразу два множителя: один меняет часы на секунды, другой — километры на метры, и получается примерно восемь и одна треть метра в секунду.



$$\frac{10 \text{ km}}{20 \text{ min}} = 0.500 \text{ km/min}$$

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

$$= 8.33 \text{ m/s}$$



Десять километров за двадцать минут

Разобранный пример учит и тому, как проверять себя, и в этом суть так называемого анализа размерностей: пусть единицы направляют и контролируют расчёт. Если поставить переводной множитель вверх ногами, единицы откажутся сокращаться, и получится бессмыслица вроде километро-часов на минуту в квадрате, что явно не скорость. Поэтому проверьте, что единицы сократились, что ответ в тех единицах, которые спрашивали, и что результат разумен: десять километров за треть часа — это тридцать за целый час. Книга также замечает, что ответ дан с тремя цифрами, и спрашивает почему; этот вопрос относится к следующей части.

Завершают часть несколько заметок на полях. Есть странные старые единицы, например фиркин, около тридцати четырёх литров, когда-то применявшийся для пива, и ячменное зерно, и каждую можно привязать к СИ. Колибри, взмахивающая крыльями пятьдесят раз в секунду, тратит на один взмах около двадцати тысячных секунды, поэтому учёный, засекающий её, измерял бы в секундах, но записал бы результат в миллисекундах. А кубический сантиметр — ровно миллилитр, и это показывает, как СИ строит свою единицу объёма прямо из единицы длины. Чего в этой части нет — так это того, насколько точно каждое из этих чисел на самом деле и сколько цифр мы вправе писать; точность, воспроизводимость и погрешность — дальше.

### **Запомним**

Физика охватывает огромный диапазон: от размера протона до краёв Вселенной и от времени, за которое свет пересекает протон, до возраста Вселенной. Перевод единиц использует переводные множители — отношения вроде тысячи метров к километру, — расположенные так, чтобы ненужная единица сократилась. Анализ размерностей означает, что единицы проверяют работу: если они не сокращаются до нужных, что-то стоит вверх ногами. Десять километров за двадцать минут — это тридцать километров в час, или примерно восемь и одна треть метра в секунду. Всегда проверяйте, что ответ в правильных единицах и разумен.

---

## Вопросы

1. Как нужно расположить переводной множитель при переводе единиц?
  - a. Так, чтобы ненужная единица сократилась, а нужная осталась
  - b. Так, чтобы большее число всегда было сверху
  - c. Так, чтобы обе единицы остались в ответе
  - d. Неважно, как его расположить
2. Вы переводили скорость и получили единицы «километро-часы на минуту в квадрате». О чём это говорит?
  - a. О том, что ответ верен, но необычен
  - b. О том, что скорость очень велика
  - c. О том, что переводной множитель поставлен вверх ногами
  - d. О том, что расстояние было в милях
3. Почему тридцать километров в час — разумный ответ для десяти километров за двадцать минут?
  - a. Потому что любой ответ в правильных единицах разумен
  - b. Потому что двадцать минут — треть часа, значит, за целый час вы проедете втрое больше
  - c. Потому что тридцать больше десяти
  - d. Потому что все городские скорости ровно тридцать
4. Что показывает то, что кубический сантиметр равен миллилитру?

- a. Что объём — основная величина
- b. Что литр старше метра
- c. Что миллилитры и сантиметры измеряют одно и то же
- d. Что  $\{\{ \text{СИ} | \text{эс-и} \} \}$  строит единицу объёма из единицы длины

## Ответы

- 1. a) Умножают на множитель, расположенный так, чтобы имеющаяся единица сократилась и осталась нужная.
- 2. c) Если множитель перевёрнут, единицы не сокращаются и вместо скорости получается бессмыслица.
- 3. b) Десять километров за треть часа — это тридцать за целый час, что совпадает с результатом.
- 4. d) Миллилитр зависит от сантиметра, поэтому единица объёма — производная от метра.

## Разобранные примеры

**Короткая поездка домой** Вы проезжаете 10,0 км от школы до дома за 20,0 мин. Найдите среднюю скорость в километрах в час и в метрах в секунду.

Средняя скорость — это путь, делённый на время: 10,0 км, делённые на 20,0 мин, дают 0,500 км в минуту.

Чтобы получить километры в час, умножьте на 60 минут в часе, чтобы минуты сократились:  $0,500 \times 60 = 30,0 \text{ км/ч}$ .

Проверка: двадцать минут — треть часа, значит, за целый час вы проедете трижды по 10 км, то есть 30 км.

Чтобы получить метры в секунду, умножьте 30,0 км/ч на 1000 метров в километре и на один час на 3600 секунд.

$30,0 \times 1000 \div 3600 = 8,33$  метра в секунду.

**Ответ:** 30,0 км/ч, то есть 8,33 м/с.

## Задачи

**1.** Переведите 80 метров в километры с помощью переводного множителя.

**Подсказка:** В 1 километре 1000 метров; расположите множитель так, чтобы метры сократились.

**Ответ:** 0,080 км: 80 м, умноженные на 1 км на 1000 м, дают  $80 \div 1000 = 0,080$  км.

**2.** Некоторые колибри взмахивают крыльями больше 50 раз в секунду. Какую основную единицу должен использовать учёный, чтобы засечь один взмах, и какая метрическая приставка подходит для результата?

**Подсказка:** Посчитайте, сколько длится один взмах, если их 50 в секунду.

**Ответ:** Основная единица — секунда. Один взмах длится одну пятидесятую секунды, 0,02 с, то есть 20 миллисекунд, поэтому естественный выбор — приставка милли, одна тысячная.

# Точно, воспроизводимо и насколько уверенно

Возьмите обычный лист бумаги для принтера и трижды измерьте его длину линейкой. На пачке написано одиннадцать дюймов, а у вас выходит одиннадцать и одна десятая, одиннадцать и две десятых и десять и девять десятых. Вы правы? Близко, но не в точности, и каждая попытка дала немного другое. В этой маленькой загадке — три идеи этой части: точность, воспроизводимость и погрешность.

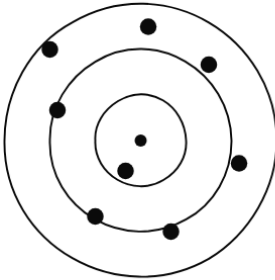


Три отсчёта 11 дюймов

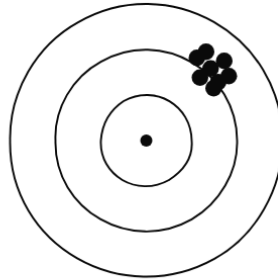
Точность — это то, насколько измерение близко к истинному значению. Все три ваших отсчёта лежат около одиннадцати дюймов, значит, они точны; отсчёт двенадцать точным бы не был. Воспроизводимость — другое: насколько близко друг к другу ложатся повторные измерения, сделанные одним и тем же способом. Ваши отсчёты разбросаны всего на три десятых дюйма, значит, они довольно хорошо воспроизводятся; отсчёты десять и девять десятых, одиннадцать и одна десятая и одиннадцать и девять десятых — нет.

Одно может быть без другого, и книга показывает это на картинке с мишенью. Представьте навигатор, который пытается найти ресторан в центре мишени, и каждая попытка отмечена точкой. На одной картинке точки широко разбросаны, но группируются вокруг центра: воспроизводимость низкая, точность высокая. На другой они сидят тесной кучкой, но далеко от ресторана: воспроизводимость высокая, точность низкая. Второй случай похож на карту в телефоне, которая очень уверенно и всегда в одном и том же месте ставит вас через дорогу от того места, где вы на самом деле стоите.

$45\,000 \pm 500$  миль



**ТОЧНО,  
НО НЕ КУЧНО**



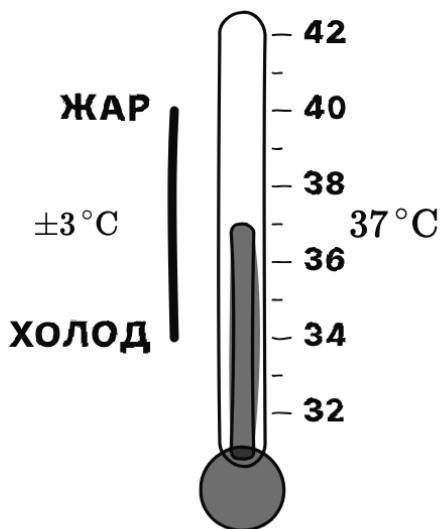
**КУЧНО,  
НО НЕ ТОЧНО**

Точно или кучно

Погрешность связывает одно с другим: это число, говорящее, насколько ваше измерение может отличаться от истинного или ожидаемого значения. Книга называет её своего рода оговоркой. Если вас спросят, сколько проехала ваша машина, вы можете сказать: сорок пять тысяч миль, плюс-минус пятьсот, то есть где-то от сорока четырёх с половиной до сорока пяти с половиной тысяч. У каждого измерения есть какая-то погрешность, и длину бумаги честно можно указать как одиннадцать дюймов плюс-минус две десятых. Она возникает из-за пределов измерительного прибора, навыка того, кто измеряет, неровностей самого предмета и всего, что ещё привносит ситуация: линейки с делениями только в десятые доли дюйма, плохого зрения, листа, отрезанного чуть криво. Приборы здесь

важны: книга показывает старые двухчашечные весы, показывающие до десятой доли грамма, рядом с электронными, показывающими до тысячной.

Почему это должно кого-то волновать? Ответ книги — больной ребёнок и градусник. Если градусник может ошибаться на три градуса Цельсия, то нормальные тридцать семь на самом деле могут означать что угодно — от опасно низких тридцати четырёх до опасного жара в сорок. Такой градусник был бы бесполезен, поэтому медицинский должен быть куда надёжнее. Проще говоря, измерение полезно ровно настолько, насколько мала его погрешность. Как записывать погрешность в процентах и сколько цифр положено результату, оставлено для следующих частей.



Градусник ошибается на три градуса

## Запомним

Точность — это то, насколько измерение близко к истинному значению. Воспроизводимость — это то, насколько повторные измерения согласуются друг с другом, и результат может обладать одним без другого. Погрешность говорит, насколько измерение может отличаться от истинного значения, и она есть у каждого измерения. Она идёт от прибора, человека, предмета и обстоятельств. Измерение со слишком большой погрешностью, как градусник, который может ошибаться на три градуса, бесполезно.

---

## Вопросы

1. Навигатор даёт тесную кучку положений, и все они далеко от ресторана. Как это описать?
  - a. Высокая точность, низкая воспроизводимость
  - b. Низкая точность, низкая воспроизводимость
  - c. Высокая воспроизводимость, низкая точность
  - d. Высокая воспроизводимость, высокая точность
2. Почему отсчёты 11,1, 11,2 и 10,9 дюйма называют довольно хорошо воспроизводимыми?
  - a. Потому что они разбросаны всего на три десятых дюйма
  - b. Потому что один из них в точности верен
  - c. Потому что их сняли электронными весами

- d. Потому что их среднее равно двенадцати
3. Почему градусник с погрешностью в три градуса бесполезен для больного ребёнка?
- a. Потому что он всегда показывал бы слишком много
  - b. Потому что три градуса — слишком мало, чтобы заметить
  - c. Потому что у градусников никогда не бывает погрешности
  - d. Потому что нормальный отсчёт на самом деле может означать что угодно, от опасного переохлаждения до опасного жара
4. Что из этого НЕ входит в источники погрешности, которые перечисляет книга?
- a. Пределы измерительного прибора
  - b. Цена измерительного прибора
  - c. Навык того, кто измеряет
  - d. Неровности измеряемого предмета

## Ответы

1. c) Точки хорошо согласуются друг с другом — это воспроизводимость, но промахиваются мимо истинного места — это плохая точность.
2. a) Воспроизводимость — это то, насколько согласуются повторные измерения, а эти отличаются не больше чем на три десятых дюйма.
3. d) Отсчёт 37 может означать что угодно от 34 до 40 градусов, а это не говорит ничего, на что можно опереться.

**4. б)** Книга называет пределы прибора, навык человека, неровности предмета и другие обстоятельства ситуации.

## Разобранные примеры

**Как читать погрешность** На вопрос о пробеге машины вы отвечаете: 45 000 миль, плюс-минус 500 миль. Какой диапазон допускает это утверждение?

Величина «плюс-минус», 500 миль, — это погрешность.

Наименьшее значение — 45 000 минус 500, то есть 44 500 миль.

Наибольшее значение — 45 000 плюс 500, то есть 45 500 миль.

Истинный пробег может быть где угодно между этими двумя.

**Ответ:** От 44 500 до 45 500 миль.

## Задачи

**1.** Вы трижды измеряете бумагу для принтера и получаете 11,1, 11,2 и 10,9 дюйма; на пачке написано 11,0 дюйма. Каков разброс ваших отсчётов и точны ли они?

**Подсказка:** Вычтите наименьший отсчёт из наибольшего, затем сравните все с 11,0.

**Ответ:** Разброс  $11,2 - 10,9 = 0,3$  дюйма, так что они довольно хорошо воспроизводятся. Все близки к 11,0 дюйма, так что они ещё и точны.

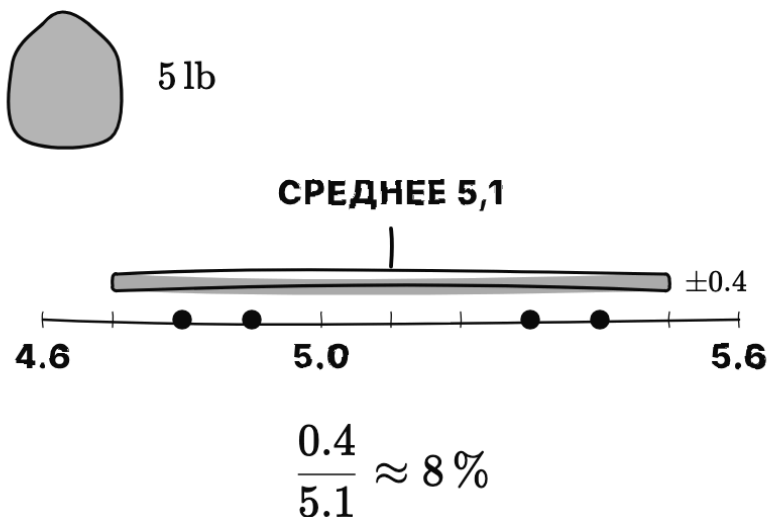
**2.** Градусник показывает 37,0 °C, но может ошибаться на 3,0 °C. Между какими двумя температурами может лежать истинное значение и почему это делает градусник бесполезным?

**Подсказка:** Вычтите и прибавьте погрешность.

**Ответ:** Между 34,0 °C и 40,0 °C. Этот диапазон тянется от опасного переохлаждения до опасного жара, поэтому по отсчёту нельзя понять, болен ли ребёнок.

# Насколько велико сомнение и сколько цифр

Четыре недели подряд покупайте пакет яблок с надписью «пять фунтов» и взвешивайте каждый дома. У вас может получиться четыре и восемь десятых, пять и три десятых, четыре и девять десятых и пять и четыре десятых. Ни разу не ровно пять — так магазин вас обманывает? Нет, если числа остаются в пределах честного «плюс-минус», и эта часть о том, как сказать, насколько велико это «плюс-минус» и сколько цифр заслуживает измерение.



Пять фунтов, плюс-минус

Первый инструмент книги — относительная погрешность в процентах: «плюс-минус», выраженное как доля измеренного значения. В примере с яблоками среднее четырёх взвешиваний — пять и одна десятая фунта, а прежние измерения показали, что вес пакета известен с погрешностью около четырёх десятых фунта. Четыре десятых от пяти и одной десятой — это около восьми процентов, так что пакет весит пять фунтов плюс-минус восемь процентов, и магазин в честных пределах. Книга добавляет напоминание: если бы то же «плюс-минус» относилось к пакету вдвое легче, относительная погрешность была бы вдвое больше.

Всё, что вы вычисляете из измерений, несёт с собой их сомнение. Если вы находите площадь пола по его длине и ширине, каждая из которых немного неопределённа, то и площадь неопределённа. Для умножения или деления измерений с небольшими погрешностями книга даёт простое правило: складывайте их относительные погрешности. Пол длиной четыре метра и шириной три метра с погрешностями в два и один процент имеет площадь двенадцать квадратных метров с погрешностью около трёх процентов. А иногда сомнение прямо решает ответ: секундомер, который может ошибаться на пять сотых секунды, не скажет вам, действительно ли одиннадцать и девяносто шесть сотых у бегуна лучше прошлонедельных двенадцати и четырёх сотых.



$$3 \text{ m} \pm 1 \%$$

$$2 \% + 1 \% = 3 \%$$

$$A = 12 \text{ m}^2 \pm 3 \%$$

$$4 \text{ m} \pm 2 \%$$

Относительные погрешности складываются

Сомнение зависит и от прибора. Линейка измеряет с точностью до миллиметра, штангенциркуль — до сотой доли миллиметра, поэтому штангенциркуль — более точный прибор. Кухонные весы, показывающие целые граммы, не могут честно сообщить дозу лекарства с точностью до десятой доли грамма, как бы внимательно вы ни смотрели. В этом идея значащих цифр: пишите столько цифр, сколько ваш прибор действительно измерил, и последняя из них — уже отчасти догадка. Палочка, длина которой по линейке тридцать шесть и семь десятых сантиметра, имеет три значащие цифры; записать тридцать шесть и семьдесят одна сотая значило бы приписать линейке точность, которой у неё нет.

С нулями нужна осторожность. Нули, которые только показывают, где стоит запятая, как в нуле целых пятидесяти трёх тысячных, не считаются. Нули между другими цифрами или в конце после запятой считаются, потому что они фиксируют настоящее измерение. Круглое число вроде тысячи трёхсот неоднозначно, ведь его нули могли быть, а могли и не быть измерены, и книга советует записывать такие числа через степени десяти, чтобы было ясно. Как сохранять значащие цифры при сложении и умножении и как делать хорошие грубые оценки, оставлено для последней части.

### **Запомним**

Относительная погрешность — это «плюс-минус», записанное как доля измеренного значения, например пять фунтов плюс-минус восемь процентов. Когда измерения перемножают или делят, их небольшие относительные погрешности складываются. Если погрешность больше той разницы, которую вы хотите увидеть, как с бегуном и секундомером, результаты нельзя различить. Значащие цифры фиксируют только те цифры, которые прибор действительно измерил, причём последняя отчасти оценена на глаз. Нули считаются, когда они измерены, а не когда только держат место для запятой.

---

## **Вопросы**

1. Если бы пакет яблок был вдвое легче, а «плюс-минус» его веса осталось тем же, что стало бы с относительной погрешностью?
  - a. Она осталась бы прежней
  - b. Она стала бы вдвое больше
  - c. Она стала бы вдвое меньше
  - d. Она исчезла бы
2. Длина пола известна с погрешностью 2 %, а ширина — 1 %. Какова погрешность площади?
  - a. Около 3 %, сумма обеих
  - b. Около 2 %, большая из двух
  - c. Около 1 %, меньшая из двух
  - d. Около 2 %, произведение обеих
3. Почему тренер не может сказать, что бегун стал быстрее — с 12,04 с до 11,96 с, — если секундомер точен до  $\pm 0,05$  с?
  - a. Потому что время спринтеров всегда ухудшается
  - b. Потому что секундомер измеряет только целые секунды
  - c. Потому что 100 метров — слишком короткая дистанция
  - d. Потому что погрешность секундомера слишком велика, чтобы различить такие близкие времена
4. Сколько значащих цифр в числе 0,053?
  - a. Четыре
  - b. Три
  - c. Две
  - d. Одна

## Ответы

1. **b)** Та же погрешность при вдвое меньшем значении составляет вдвое большую его долю.
2. **a)** Когда перемножают измерения с небольшими погрешностями, их относительные погрешности складываются.
3. **d)** Когда «плюс-минус» не меньше той разницы, которую хотят увидеть, результаты нельзя различить.
4. **c)** Нули впереди только отмечают, где стоит запятая, поэтому считаются только 5 и 3.

## Разобранные примеры

**Пакет яблок** Пакет яблок на 5 фунтов за четыре недели весил 4,8, 5,3, 4,9 и 5,4 фунта. Погрешность его среднего веса  $\pm 0,4$  фунта. Найдите средний вес и относительную погрешность.

Сложите четыре веса:  $4,8 + 5,3 + 4,9 + 5,4 = 20,4$  фунта.

Разделите на четыре, чтобы получить среднее:  $20,4 \div 4 = 5,1$  фунта.

Относительная погрешность — это погрешность, делённая на значение, умноженная на 100 %:  $0,4 \div 5,1 \times 100$  %.

Получается около 8 %, и среднее 5,1 фунта согласуется с 5 фунтами на этикетке в пределах погрешности 0,4 фунта.

**Ответ:** Среднее 5,1 фунта; пакет весит 5 фунтов  $\pm 8$  %.

## Задачи

1. Пол длиной 4,00 м и шириной 3,00 м, погрешности 2 % и 1 %. Какова его площадь и погрешность площади в процентах и в квадратных метрах?

**Подсказка:** Перемножьте, чтобы получить площадь, сложите проценты, затем возьмите этот процент от площади.

**Ответ:** Площадь  $12,0 \text{ м}^2$  с погрешностью 3 %. Три процента от  $12,0 \text{ м}^2$  — это  $0,36 \text{ м}^2$ , с округлением  $0,4 \text{ м}^2$ .

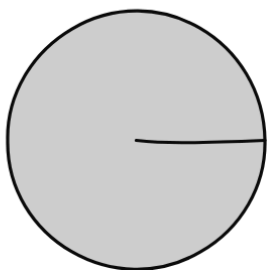
**2.** Сколько значащих цифр в каждом числе: 0,0009; 15 450,0; 87,990; 30,42?

**Подсказка:** Нули впереди только ставят запятую на место; нули после запятой или между цифрами были измерены.

**Ответ:** В 0,0009 — 1; в 15 450,0 — 6; в 87,990 — 5; в 30,42 — 4.

# Честные ответы и хорошие прикидки

Введите площадь небольшого круглого стола в калькулятор, и он может выдать восемь цифр: четыре целых пять миллионов двести тридцать восемь тысяч девятьсот тридцать четыре десятиллионных квадратного метра. Каждая из этих цифр выглядит уверенной. Но если вы измерили радиус стола как одну целую две десятых метра, смысл имеют только две из них. Эта последняя часть о том, сколько цифр заслужил ответ, а затем о противоположном умении — сделать хорошую грубую прикидку почти совсем без цифр.



$$r = 1.2 \text{ m}$$

$$4.5238934 \text{ m}^2$$

$$A = \pi r^2 \approx 4.5 \text{ m}^2$$

**2 ЗНАЧ. ЦИФРЫ**

Сколько цифр позволяет радиус

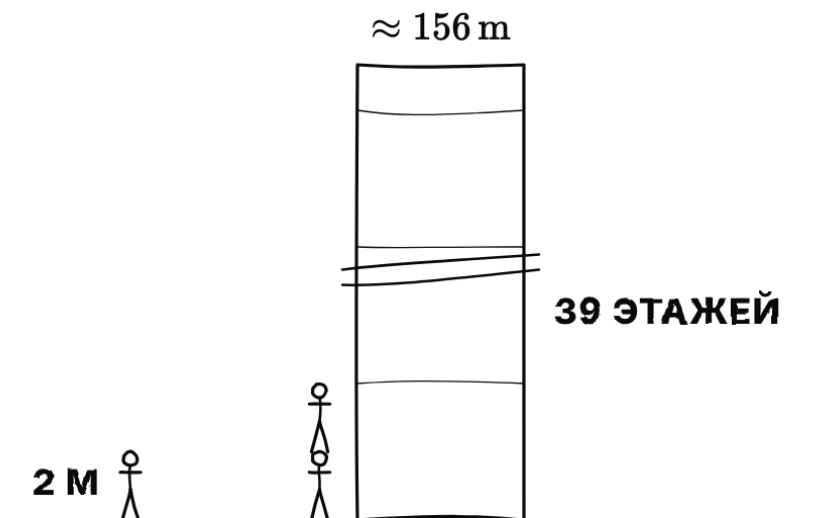
Основное правило простое: ответ никогда не может быть точнее самого неточного измерения, которое в него вошло. При умножении и делении правило книги — оставлять столько значащих цифр, сколько их у измерения, где их меньше всего. У радиуса стола их было две, поэтому площадь — четыре целых пять десятых квадратного метра, хотя число  $\pi$  известно с гораздо большим числом знаков. Это как доза лекарства, рассчитанная по весу с напольных весов: доза не может быть точнее показания весов, из которого она получена.

При сложении и вычитании правило касается уже знаков после запятой. Пример книги прослеживает партию картофеля: семь целых пятьдесят шесть сотых килограмма куплены на магазинных весах, показывающих сотые, шесть целых пятьдесят две тысячных килограмма отданы в лабораторию на весах, показывающих тысячные, и тринадцать целых семь десятых килограмма добавлены дома на напольных весах, показывающих только десятые. Посчитайте — и получится пятнадцать целых двести восемь тысячных, но напольные весы знали только десятые, поэтому честный ответ — пятнадцать целых две десятых килограмма. Точные числа, например два мешка, сосчитанные в итоге, или двойка в формуле длины окружности, никогда не ограничивают число цифр, потому что у них вообще нет погрешности. Сама книга в основном работает с тремя значащими цифрами и берёт больше только там, где это нужно предмету, например оптике.

$$\begin{array}{r}
 7.56 \text{ kg} \\
 - 6.052 \text{ kg} \\
 + 13.7 \text{ kg} \quad \text{ТОЛЬКО ДЕСЯТЫЕ} \\
 \hline
 15.208 \text{ kg} \longrightarrow 15.2 \text{ kg}
 \end{array}$$

Сложение: меньше всего знаков после запятой

Затем книга переворачивает вопрос. Часто учёным и инженерам вовсе не нужно много цифр; им нужна быстрая, здравая оценка, которую книга называет прикидкой. Как далеко до определённого места, какова плотность определённого предмета, примерно какой ток течёт в цепи? Такие приближения отсекают невозможные ответы, позволяют оспаривать чужие утверждения и направляют мысль. Это умение растёт с практикой, с чувством единиц и со смелостью назвать число.

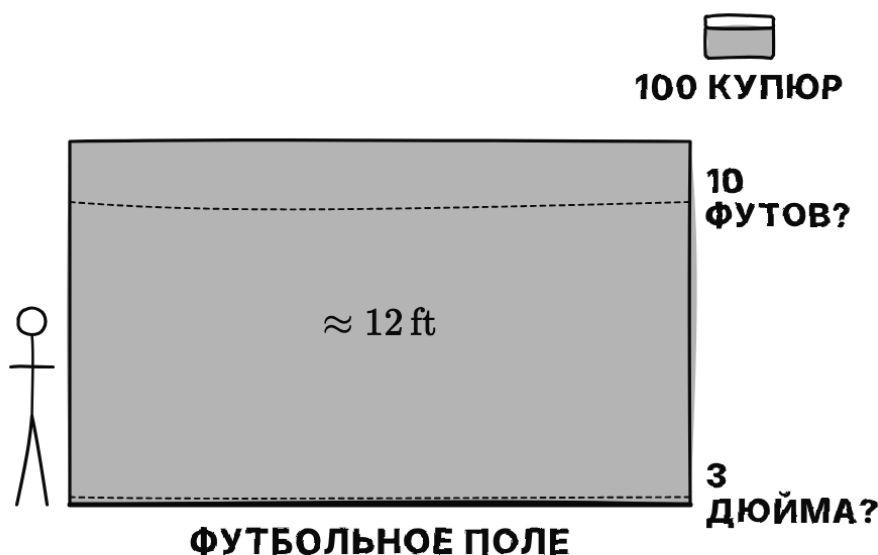


Здание в людях

Первый пример оценивает тридцатидевятиэтажное здание, масштабируя рост человека. Книга принимает рост человека около двух метров, а этаж — около двух людей в высоту, так что здание выходит примерно в сто пятьдесят шесть метров. То же можно сделать по собственному телу: если ваша ладонь около десяти сантиметров в ширину, несколько ладоней скажут вам ширину стола без рулетки.

Второй пример берётся за число, которое почти никто не может себе представить, — триллион долларов. Представьте триллион долларов в стодолларовых купюрах, связанных в банковские пачки по сто купюр и ровно разложенных по футбольному полю. Один друг думает, что куча будет высотой три дюйма, другой —

десять футов. Пройдя расчёт грубыми шагами, с одной значащей цифрой, книга находит около ста миллионов пачек, каждая размером с небольшую книжку в мягкой обложке, и поле около шести миллионов квадратных дюймов; разделив одно на другое, получаем кучу высотой около ста пятидесяти дюймов, примерно двенадцать футов. Значит, догадка про десять футов была близка, а про три дюйма — намного меньше нужного, и тщательная оценка побеждает обе догадки наугад.



Триллион долларов на поле

Книга завершает главу ещё одним приглашением: оценить баскетбольную площадку одним лишь устным счётом. Уложите воображаемых людей ростом около двух метров друг за другом — пятнадцать вдоль и семь поперёк, — и площадь выйдет примерно

четыреста двадцать квадратных метров. На этом первая глава закончена: физика как поиск простых законов, построенная на согласованных единицах, честная в своей погрешности и уверенно владеющая как аккуратными цифрами, так и смелыми, здоровыми оценками.

### **Запомним**

Ответ никогда не бывает точнее самого неточного измерения, на котором он стоит. При умножении или делении оставляйте столько значащих цифр, сколько у данного с наименьшим их числом; при сложении или вычитании — столько знаков после запятой, сколько у наименее точного данного. Точные числа, например сосчитанные предметы, никогда не ограничивают число цифр. Хорошее приближение, масштабированное от знакомых вещей вроде роста человека, быстро отсекает невозможные ответы. Триллион долларов стодолларовыми купюрами покрыл бы футбольное поле слоем глубиной около двенадцати футов.

---

## **Вопросы**

1. Радиус круга измерен как 1,2 м. Почему его площадь нужно указать как 4,5 квадратного метра, а не 4,5238934?
  - а. Потому что число пи известно только с двумя знаками
  - б. Потому что калькуляторы ошибаются после двух цифр

- c. Потому что у радиуса только две значащие цифры, и это ограничивает результат
  - d. Потому что площади всегда округляют до одного знака после запятой
- 2. Картофель, взвешенный как 7,56 кг, 6,052 кг и 13,7 кг, объединяют в одном расчёте. Почему ответ дан с точностью до десятых?
  - a. Потому что наименее точное измерение, 13,7 кг, было известно только до десятых
  - b. Потому что лабораторные весы были самыми точными
  - c. Потому что картофель нельзя взвесить точнее
  - d. Потому что сложение всегда убирает два знака после запятой
- 3. Почему подсчёт числа мешков никогда не ограничивает значащие цифры итога?
  - a. Потому что сосчитанные числа всегда большие
  - b. Потому что сосчитанные числа округляются
  - c. Потому что мешки никогда не взвешивают
  - d. Потому что сосчитанное или точное число не имеет погрешности
- 4. Для чего главным образом нужно грубое приближение, или прикидка?
  - a. Чтобы заменить все тщательные измерения
  - b. Чтобы быстро отсеять невозможные ответы и направить мысль
  - c. Чтобы получить точный ответ без всякой работы

d. Чтобы вообще не пользоваться единицами

## Ответы

1. c) При умножении в ответе остаётся столько значащих цифр, сколько у данного с наименьшим их числом, здесь — у радиуса, у которого их две.
2. a) При сложении и вычитании в ответе остаётся не больше знаков после запятой, чем у наименее точного измерения.
3. d) Точные числа, как сосчитанные предметы или двойка в формуле длины окружности, не имеют погрешности.
4. b) Приближения отсекают нереальные числа, позволяют оспаривать утверждения и направляют подход к задаче.

## Разобранные примеры

**Высота 39-этажного здания** Оцените высоту 39-этажного здания, считая рост человека около 2 м, а один этаж — около двух людей в высоту.

Один этаж — около двух человек, каждый около 2 м, значит, этаж — около 4 м.

Этажей 39.

Перемножаем:  $39 \times 4 \text{ м} = 156 \text{ м}$ .

**Ответ:** Около 156 м.

## Задачи

1. У женщины три сумки: две весят по 13,5 фунта, одна — 10,2 фунта. Каков общий вес с правильным числом цифр?

**Подсказка:** Число сумок, две, точное; посмотрите на знаки после запятой у весов.

**Ответ:** 37,2 фунта:  $13,5 + 13,5 + 10,2 = 37,2$ . Число сумок точное и не ограничивает число цифр.

**2.** Тележка массой 55 кг разгоняется с ускорением  $0,0255 \text{ м/с}^2$ . Сила равна массе, умноженной на ускорение. Какова сила с правильным числом значащих цифр?

**Подсказка:** Перемножьте, затем оставьте столько значащих цифр, сколько у данного с наименьшим их числом.

**Ответ:** 1,4 Н:  $55 \times 0,0255 = 1,4025$ , а поскольку у 55 кг только две значащие цифры, ответ округляется до двух.