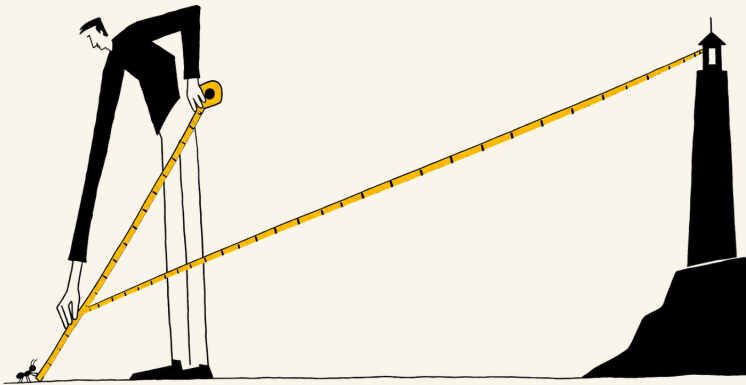


Физика для колледжа



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

Одни и те же законы здесь и там

Один закон для чипсов и аккумуляторов

От микроволновки до атома

Законы, теории и машина, которая не заводится

Когда обычные правила кончаются

Двенадцать чего?

Метр из света, килограмм из постоянных

От протона до края Вселенной

Близко к истине или близко друг к другу

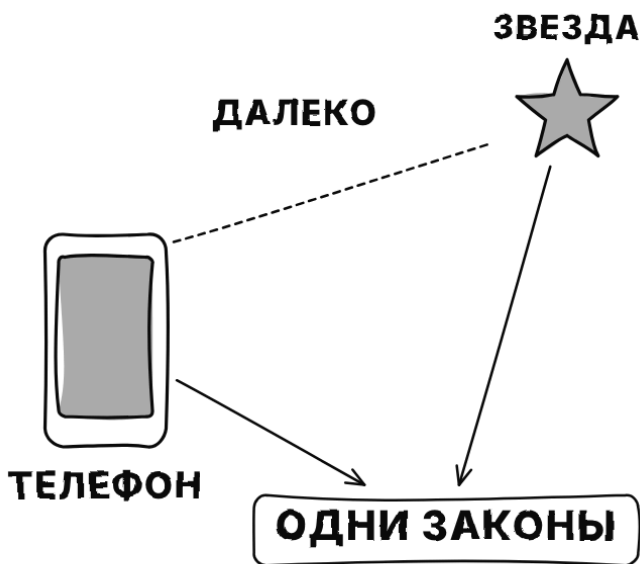
Плюс-минус

Сколько цифр вы заслужили

Честные цифры и смелые прикидки

Одни и те же законы здесь и там

Сегодня вечером, если небо ясное, подойдите к окну и найдите одну яркую звезду. Теперь поднимите рядом с ней телефон, чтобы светящийся экран и крошечная точка света оказались бок о бок. Казалось бы, они совсем разные: одно — плоский кусочек стекла у вас в руке, другое — шар раскалённого газа на невообразимом расстоянии. И всё же свет обоих подчиняется одним и тем же законам природы, тем самым, что греют сковороду на плите и тянут упавший ключ к полу. Эта мысль, что близкое и далёкое подчиняются одному набору законов, и есть обещание, с которого начинается книга.



Одни законы для всего

Многие встречают слово «физика» с лёгким страхом. Им представляются страницы трудных уравнений и формул, которые как будто не имеют отношения к обычной жизни. Книга отвечает на этот страх прямо: физика играет в вашей жизни гораздо большую роль, чем кажется, кем бы вы ни работали.

Её первая картинка — облако в космосе, которое называется туманность Вуаль. Оно находится примерно в двух тысячах четырёхстах световых годах от нас, а световой год — это расстояние, которое свет проходит за целый год, почти десять триллионов километров. Представьте огромную светящуюся вуаль из тонких нитей и полотен, как дым, выхваченный вспышкой света. Это остатки звезды, взорвавшейся около восьми

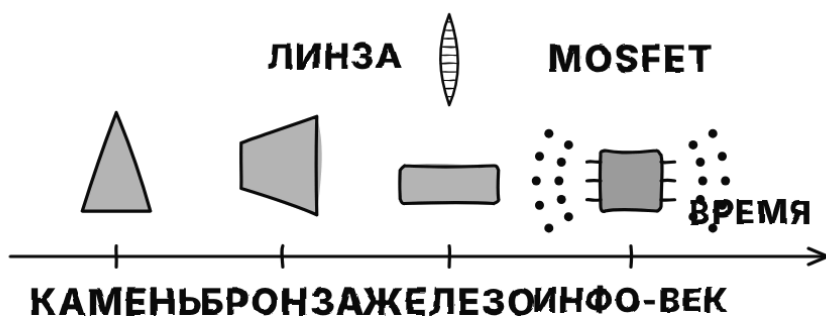
тысяч лет назад, и ударная волна до сих пор несётся наружу, врежется в газ и пыль и заставляет их светиться. Учёные сравнивают новые снимки с теми, что телескоп «Хаббл» сделал в 1997 году, и по тому, как изменилось облако, узнают, как растут такие облака. И силы, которые формируют это облако, — те же силы, с которыми мы имеем дело на Земле, запускаем ли мы ракету в космос или просто отапливаем новый дом. Даже его цвета — это свечение водорода, серы и кислорода, того же вещества, из которого сделано всё вокруг нас.

Опыт

Ясной ночью посмотрите минуту на звёзды, а потом на горящую лампу в комнате. Мысль книги в том, что одна и та же горстка законов объясняет оба света; разница лишь в масштабе и расстоянии.

Затем рассказ переходит от неба к нашему прошлому. Великие эпохи истории мы называем по материалам — каменный век, бронзовый век, железный век, — потому что каждая строилась на знании того, как ведёт себя какой-то материал и как его обрабатывать. Знать, куда ударить по камню, чтобы откололось острое остриё, узнать в печах Южной Индии и Шри-Ланки, что углерод, добавленный к железу, даёт первую хорошую сталь, шлифовать и полировать стекло, пока оно не станет линзой, — всё это физика, освоенная руками. Наше время называют информационной эпохой, и она тоже держится на одном крошечном изобретении. В 1959 году в лаборатории в Нью-Джерси Мохамед Аталла, родом из Египта, и Давон Канг, родом из Кореи, изобрели микроскопический электронный

переключатель — MOSFET. Почти никто о нём не слышал, но таких переключателей сделано больше, чем любых других предметов в истории человечества. В вашем телефоне их миллиарды, а другие работают в системе управления автомобиля, в микроволновке и в приборах во врачебном кабинете.



Эпохи, построенные на материалах

Затем книга указывает на новейшие чудеса из новостей: поезда, парящие над рельсами, плащи, которые огибают себя светом, крошечных роботов, атакующих раковые клетки внутри тела. Какими бы удивительными или обыденными они ни были, все они держатся на физике. А физика — часть многих профессий, в которых о ней даже не упоминают. Пилот должен понимать, как

ветер сносит самолёт с курса, а физиотерапевт — понимать силы, действующие на мышцу, когда тело сгибается. Даже спутниковая карта в вашем телефоне, которая показывает, где вы находитесь, с точностью до нескольких метров, — это тихая работа физики.

Наконец, книга намечает путь вперёд. Сначала — краткая история того, как люди начали изучать природу, от древних мыслителей Ближнего Востока и Средиземноморья до Исаака Ньютона и законов, названных его именем. Затем — общая система единиц, договорные метр, секунда и килограмм, которая позволяет учёным всего мира говорить на одном математическом языке. Именно поэтому кухонные весы в одной стране и аптечные весы в другой сходятся в том, что такое грамм. И наконец — честная часть: насколько близко любое измерение может подойти к истине и почему учёные так стараются точно сказать, насколько они уверены или не уверены.

Запомним

Физика — не груда формул, оторванных от жизни; она часть почти всего, чем вы пользуетесь и что делаете. Силы, которые формируют далёкую взорвавшуюся звезду, — те же, что мы встречаем на Земле. Каждая эпоха техники, от заострённого камня до миллиардов крошечных переключателей в телефоне, выросла из понимания того, как ведут себя материалы. Книга пойдёт от истории предмета к общим единицам измерения, а затем к тому, насколько мы можем быть уверены в любом измерении.

Вопросы

1. Почему книга начинается с облака в космосе, удалённого на тысячи световых лет?
 - a. Чтобы показать, что силы, формирующие его, — те же, с которыми мы имеем дело на Земле
 - b. Чтобы показать, что космосом управляют законы, совсем не похожие на наши
 - c. Чтобы показать, что физика по-настоящему нужна только астрономам
 - d. Чтобы показать, что облако скоро достигнет Земли
2. Что общего у каменного, бронзового и железного веков?
 - a. Каждый начинался, когда на небе замечали новую звезду
 - b. Каждый строился на знании того, как ведёт себя материал и как его обрабатывать
 - c. Каждый кончался, когда люди забывали, как делать орудия
 - d. Каждый назван по имени людей, изобретших его орудия
3. Почему MOSFET — подходящий символ нашей информационной эпохи?
 - a. Это самая большая машина из когда-либо построенных
 - b. Он знаменит и известен почти всем
 - c. Их сделано больше, чем любых других предметов, и они есть почти в каждом устройстве

- d. Это первое устройство, которое использовало электричество
4. Почему, по словам книги, учёные так стараются сказать, насколько они уверены в измерении?
- a. Потому что измерения всегда совершенно точны
 - b. Потому что единицы в разных странах разные
 - c. Потому что в физике допустимы только грубые догадки
 - d. Потому что ни одно измерение не идеально, и честность о его пределах — часть научной работы

Ответы

1. **a)** Силы, формирующие это облако, — те же, что действуют, когда мы запускаем ракету или отапливаем дом.
2. **b)** Каждая из этих эпох держалась на понимании какого-то материала, а такое понимание — это физика, освоенная руками.
3. **c)** Почти никто не знает его названия, но этих крошечных переключателей больше, чем любых других предметов: они в телефонах, машинах и печках.
4. **d)** Последняя часть намеченного пути — о том, насколько близко любое измерение может подойти к истине, и о том, чтобы точно сказать, насколько ты уверен.

Задачи

1. Назовите одну знакомую вам профессию, которая не называется физикой, и объясните, какую часть физики должен понимать человек этой профессии, как книга делает это для пилота и физиотерапевта.

Подсказка: Подумайте, что в этой работе толкает, тянет, нагревается или движется.

Ответ: Например, водитель доставки должен оценивать, за какое расстояние остановится гружёный фургон, а это вопрос сил и движения. Как пилот, которому нужно понимать, как ветер сносит самолёт с курса, водитель каждый день пользуется физикой, не называя её так.

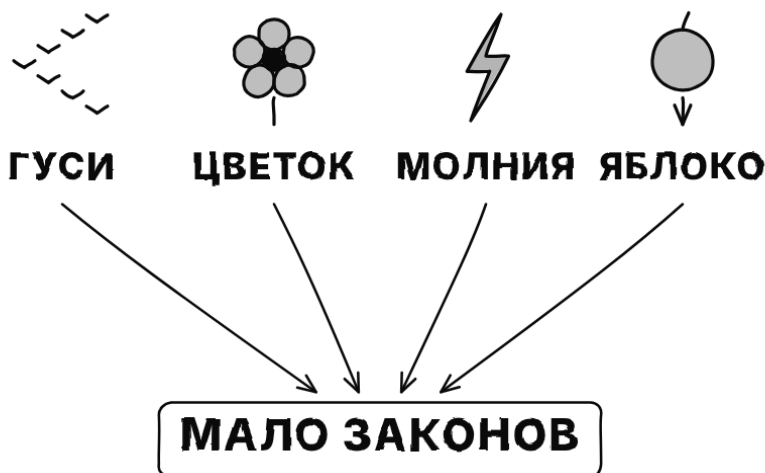
2. Почему важно, чтобы учёные во всём мире пользовались одними и теми же метром, секундой и килограммом? Объясните на бытовом примере.

Подсказка: Представьте двух людей в разных странах, которые попытаются сравнить результат измерения.

Ответ: Общая система единиц позволяет всем говорить на одном языке измерений. Грамм на кухонных весах в одной стране — тот же грамм на аптечных весах в другой, поэтому результат, измеренный в одном месте, значит то же самое повсюду.

Один закон для чипсов и аккумуляторов

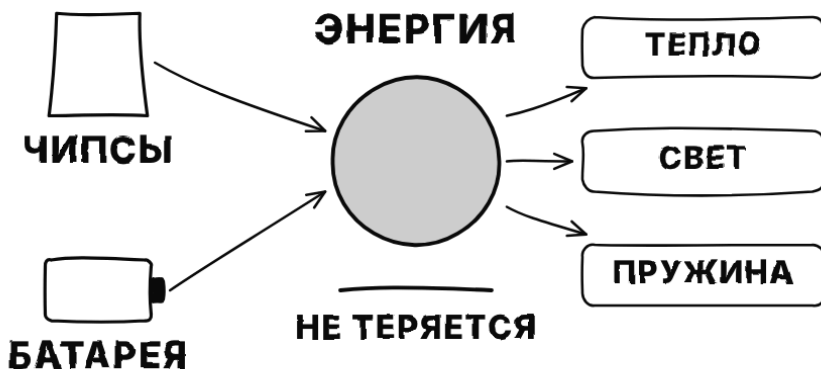
Представьте стаю гусей, летящих осенью на юг длинным клином через всё небо. Теперь представьте цветок, вспышку молнии, яблоко, падающее с ветки. Казалось бы, каждому из них нужно своё объяснение, отдельный свод правил для птиц, для цветов, для гроз. Неожиданность, с которой книга начинает эту главу, — обратное: даже гуси в своём клине подчиняются законам физики, тем же законам, что управляют всем остальным.



Много вещей, мало законов

Мир бесконечно подробен. Каждый день мы видим огромное разнообразие вещей и событий, и за века люди накопили о них горы фактов — от полёта птиц и окраски цветов до мельчайших частиц, крупнейших скоплений галактик, течения времени и начала Вселенной. И всё же перед лицом всех этих подробностей мы обнаружили, что удивительно небольшой набор законов, согласующихся друг с другом, объясняет то, что мы видим. Люди естественно ищут закономерности и порядок, и природа, оказывается, идёт навстречу: в глубине она упорядочена и проста. Именно этот скрытый порядок делает изучение физики удовольствием, а не обузой.

Вот собственный пример книги. Что общего у пачки чипсов и автомобильного аккумулятора? Кажется, что они из разных миров: одно с кухни, другое из гаража. Но в обоих запасена энергия, которая может превращаться в другие формы: чипсы — в тепло и движение вашего тела, аккумулятор — в искру, которая заводит двигатель. Их связывает один закон, закон сохранения энергии: энергия может переходить из одной формы в другую, но никогда не теряется. Тот же закон связывает калории, напечатанные на пачке, и заряд вашего телефона, и он же охватывает тепло, свет и заведённую пружину старых часов. Стоит узнать это одно правило — и все эти формы энергии перестают быть списком для заучивания и становятся одной историей, рассказанной в разных обстановках.



Энергия меняет форму

Так книга даёт своё обещание. Её главная мысль в том, что физические законы объединяют вещи и что природа в основе проста. По пути вы познакомитесь с важнейшими темами физики, но настоящая награда — умение: способность взять несколько законов и применять их далеко за пределами того, что может охватить одна книга. Это умение, внимательное мышление с небольшим набором правил, помогает и в учёбе, и в любой работе.

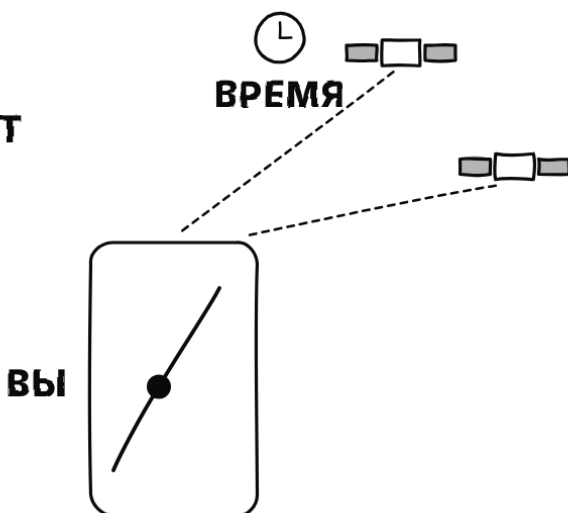
Так что же такое физика? Наука, по словам книги, — это общие истины о природе, её теории и законы, вместе со всеми знаниями, которые в них заключены, и учёные продолжают пополнять эти знания и всё яснее формулировать законы.

Физика — это часть науки, которая описывает, как энергия, вещество, пространство и время действуют друг на друга, и прежде всего спрашивает, какой основной механизм лежит под каждым явлением. Её охват простирается от крошечных электрически заряженных частиц до движения людей, машин и космических кораблей, и почти всё вокруг вас можно довольно точно описать её законами.

Возьмите смартфон. Физика описывает, как электричество движется по его схемам, и инженеры пользуются этим знанием, чтобы выбирать материалы и располагать схемы, когда собирают телефон. Теперь откройте карту на том же телефоне: синяя точка, которая следует за вами по улице, опирается на простое соотношение из физики — между тем, какое расстояние что-то проходит, как быстро движется и сколько времени это занимает. Чтобы правильно определить ваше место, системе нужно учесть холмы и долины на земле, точные расстояния до спутников над головой и даже тонкий эффект, при котором время для спутников идёт чуть иначе, чем для нас. Большая часть этих расчётов выросла из работы Глэдис Уэст, математика и программиста, которая программировала первые компьютеры, способные очень точно определять места на Земле. Каждый раз, когда телефон показывает, сколько продлится поездка, он пользуется её методами и этими законами физики.

$$d = v \times t$$

ГЛЭДИС УЭСТ



Физика за картой

Запомним

Мир невероятно разнообразен, но небольшой набор согласованных законов объясняет большую часть того, что мы видим. В глубине природа упорядочена и проста, и именно поэтому физику приятно изучать. Закон сохранения энергии — энергия меняет форму, но никогда не теряется — связывает такие разные вещи, как чипсы, аккумуляторы, тепло и свет. Физика описывает, как вещество, энергия, пространство и время действуют друг на друга, и ищет основной механизм за каждым явлением. И схемы вашего телефона, и его карта работают по этим законам.

Вопросы

1. Что обнаружили люди, накопив горы фактов о природе?
 - a. Что каждому роду вещей нужен свой отдельный набор правил
 - b. Что удивительно небольшой набор согласованных законов объясняет большую часть из них
 - c. Что в природе нет порядка и её можно только перечислять
 - d. Что физическим законам подчиняются только самые большие тела
2. Что общего у пачки чипсов и автомобильного аккумулятора?
 - a. В обоих запасена энергия, которая может превращаться в другие формы
 - b. Оба сделаны из одних и тех же материалов
 - c. Оба после использования теряют свою энергию бесследно
 - d. Оба работают только в тепле
3. О чём прежде всего спрашивает физика, глядя на любое явление природы?
 - a. Насколько оно красиво
 - b. Кто его первым увидел
 - c. Какой основной механизм лежит под ним
 - d. Можно ли его продать

4. Почему карте в телефоне приходится учитывать спутники и даже само время?
- a. Потому что спутники нужно регулярно чинить
 - b. Потому что у телефона нет собственных часов
 - c. Потому что карты каждый день меняют форму
 - d. Потому что ваше место определяется через «как далеко, как быстро и как долго», а время там, наверху, идёт чуть иначе

Ответы

1. **b)** Перед лицом всех этих подробностей мы обнаружили, что небольшой единый набор законов объясняет то, что мы видим.
2. **a)** Каждый хранит энергию, которая переходит в другие формы, и закон сохранения энергии охватывает оба.
3. **c)** Физика описывает, как энергия, вещество, пространство и время действуют друг на друга, и ищет основной механизм за каждым явлением.
4. **d)** Синяя точка опирается на соотношение расстояния, скорости и времени, и расчёт должен учитывать точные расстояния до спутников и чуть иной ход времени для них.

Задачи

1. Книга связывает одним законом калории в еде, аккумуляторы, тепло, свет и пружины часов. Выберите что-нибудь одно и опишите с помощью закона сохранения энергии, как его энергия меняет форму.

Подсказка: Начните с того, где энергия запасена, а потом проследите, куда она уходит.

Ответ: Например, заведённая пружина часов запасает энергию; раскручиваясь, она вращает шестерёнки, и энергия становится движением, а небольшая её часть — теплом от трения. По пути энергия меняет форму, но ничего не теряется.

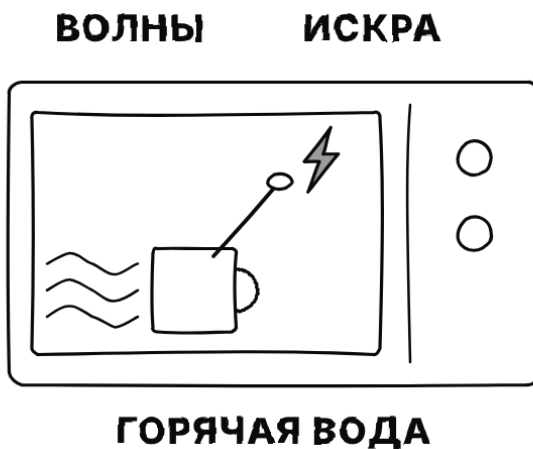
2. Почему, по словам книги, выучить несколько законов ценнее, чем запомнить множество фактов? Объясните своими словами.

Подсказка: Подумайте, что можно сделать с правилом и чего нельзя сделать со списком.

Ответ: Небольшой набор законов позволяет понимать то, чего вы никогда не изучали, потому что он связывает множество, казалось бы, не связанных тем. Список фактов охватывает только то, что в нём записано; закон можно применять далеко за пределами любой отдельной книги — в учёбе и в любой работе.

От микроволновки до атома

Поставьте чашку воды в микроволновку и включите её на минуту. Сама чашка местами едва тёплая, а вода в ней горячая. А теперь представьте то же самое с металлической ложкой в чашке: вы увидите, как у стенки печи с треском проскакивают искры, и каждая инструкция предупреждает никогда так не делать. Почему вода греется, а ложка искрит? Чтобы задать этот вопрос, не нужно быть учёным, и мысль книги в том, что физика даёт ответ обычным людям, а не только специалистам.



Вода греется, ложка искрит

Физика помогает понять, как микроволновая печь греет еду, почему в ней не должно быть металла и почему такие печи могут мешать работе кардиостимулятора. Она помогает трезво оценивать опасность радиации, а не со страху или по слухам. Она объясняет, почему чёрный радиатор помогает отводить тепло от двигателя машины и почему белая крыша в жаркий день сохраняет дом прохладнее внутри. Представьте две машины на летнем солнце, чёрную и белую: в белой внутри остаётся приятнее, и причина та же физика, из-за которой белая крыша охлаждает дом. Она даже объясняет зажигание в машине и электрические сигналы, бегущие по нервам вашего собственного тела. Ничему из этого не нужна лаборатория, только чутьё к основным правилам.

Физика — ещё и пол, на котором стоят многие другие предметы. Химия изучает, как атомы и молекулы ведут себя вместе, поэтому она вырастает прямо из физики атомов. Большинство видов инженерного дела — это просто физика, поставленная на работу. В архитектуре физика держит здания на ногах и определяет, как в них звучит звук, как их отапливают, освещают и охлаждают. Геологи опираются на неё, чтобы определять возраст горных пород по их естественной радиоактивности, изучать землетрясения и следить за теплом внутри Земли. Некоторые области даже носят это слово в названии, например биофизика и геофизика, — наполовину физика от рождения.



Физика под науками

Живое тоже полно физики. В самом малом масштабе она помогает описать стенки растительных клеток, похожие на аккуратные маленькие кирпичики, которые видны в коже лука под микроскопом, и тонкие мембраны, окутывающие клетки животных, где происходит нечто столь основное, как срабатывание нерва. В масштабе всего тела она объясняет тепло, которое мы отдаём, работу, которую совершают наши мышцы, и мощность, которую они развивают. Медицина пользуется ею постоянно: рентген, магнитно-резонансная томография и ультразвуковые измерения кровотока — всё это физика. Лечение тоже может быть физикой, как когда излучение направляют на опухоль, чтобы бороться с раком. И она объясняет наши чувства:

как музыкальный инструмент издаёт звук, как глаз различает цвета, как лазер передаёт информацию.

Книга добавляет пару картинок, которые поначалу кажутся не связанными. Одна — микроволновая печь, другая — снимок человеческого мозга. Связь в том, что обе работают с волнами одного рода, невидимыми; печь греет ими еду, а томограф строит изображение мозга настолько точное, что видно, где находится опухоль. Так что коробка у вас на кухне и аппарат в больнице — родственники, построенные на одной и той же физике.

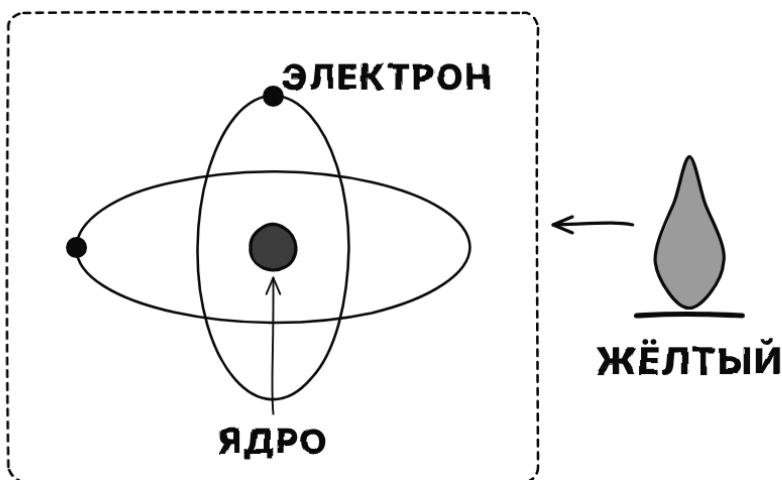
Изучить все эти применения невозможно, и книга говорит, что и не нужно. Стоит иметь основные законы и умение их применять, что заодно оттачивает умение решать задачи вообще. Поскольку физика хранит самые основы науки, ею пользуются все остальные науки, и, изучив её, их легче понять.

Откуда берутся эти законы? Книга говорит ясно: законы природы не придуманы людьми. Они встроены во Вселенную; мы их не создавали и не можем изменить, мы можем только открыть их и понять. Открывать их — глубоко человеческое приключение, полное тайны, воображения, борьбы, побед и разочарований. Исаака Ньютона пришлось уговаривать опубликовать его революционный труд, а в старости он руководил Королевским монетным двором, где ввёл насечку на ребре монет, чтобы мошенники не могли срезать с них серебро. Мария Кюри тратила на первые исследования собственные деньги и подорвала здоровье облучением; она до сих пор единственный человек, получивший Нобелевские премии и по физике, и по химии. А основа всякого такого открытия — наблюдение: наука должна

описывать мир таким, какой он есть на самом деле, а не каким нам хотелось бы его представить.

Всё начинается с обычного любопытства. Мы смотрим на небо и гадаем, не значит ли облако определённого вида, что надвигается гроза. Когда мы берёмся за дело всерьёз, мы становимся организованными: тщательно собираем и упорядочиваем наблюдения, стараемся измерять точнее, где можно — ставим контролируемые опыты и записываем мысли о том, как факты складываются вместе. Из всего этого мы строим инструменты, которыми наука подытоживает найденное, и первый из них — модель.

МОДЕЛЬ



Планетарная модель атома

Модель — это изображение чего-то, что слишком трудно или невозможно показать напрямую. Она опирается на данные, но хорошо работает только в определённых пределах. Пример книги — планетарная модель атома, в которой крошечные электроны кружат вокруг центра атома, как планеты вокруг Солнца. Никто на самом деле не может увидеть, как вращается электрон, но эта мысленная картина помогает объяснить то, что мы видеть можем, например особые цвета света, которым светится горячий газ.

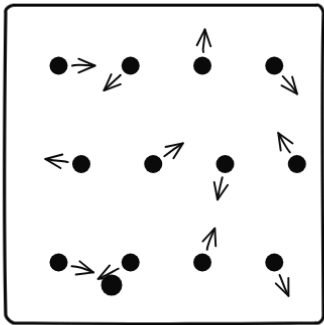
Опыт

Посмотрите на натриевый уличный фонарь или бросьте щепотку поваренной соли в газовое пламя плиты. Вы увидите, как пламя вспыхнет ярким жёлто-оранжевым вместо синего. Этот постоянный цвет, каждый раз один и тот же, — как раз такое наблюдение, для объяснения которого и строилась модель атома.

Физики пользуются моделями по-разному: чтобы продумать ситуацию и рассчитать ответ или чтобы воссоздать её как симуляцию на компьютере. Приложение погоды, показывающее, как гроза движется по карте, — модель такого рода: никто не может увидеть всю атмосферу сразу, поэтому компьютер её изображает, чтобы помочь предсказать, что будет дальше. Газ — ещё один хороший пример: его атомы и молекулы слишком малы, чтобы их увидеть, поэтому мы представляем их крошечными отскакивающими частицами, чтобы понять, что сообщают нам приборы. Для учёного теория — не догадка, а проверяемое объяснение закономерностей природы,

подкреплённое данными и много раз подтверждённое разными группами исследователей. А если опыт когда-нибудь покажет, что предсказание теории неверно, теорию либо отбрасывают, либо меняют, например сужая круг случаев, которые она берётся описывать. Одним научным объяснениям такая картина нужна, другим нет, и чем модель отличается от теории и закона — тема следующей части.

МОДЕЛЬ ГАЗА



ТЕОРИЯ ✓

↑ **ПРОВЕРЕНА**
ИЗМЕНИТЬ

× **ОПРОВЕРГНУТА**

Газ как отскакивающие частицы

Запомним

Физика полезна каждому: она объясняет микроволновку, белую крышу, радиатор машины и сигналы в наших нервах. На ней стоят химия, инженерное дело, архитектура, геология, биология и медицина. Важно не выучить все применения, а знать основные законы и уметь их применять. Законы природы открывают, а не придумывают, и на первом месте — наблюдение мира таким, какой он есть. Модель — это изображение того, что мы не можем увидеть напрямую, как атом, нарисованный крошечной Солнечной системой; она помогает объяснить наблюдаемое, но только в определённых пределах.

Вопросы

1. Что связывает микроволновую печь и томограф мозга?
 - a. И тем и другим должны пользоваться только врачи
 - b. Оба работают с волнами одного рода, невидимыми, но для разных задач
 - c. Оба нагревают всё, что в них помещают
 - d. Оба изобретены для борьбы с раком
2. Почему химия вырастает прямо из физики?
 - a. Потому что химия имеет дело с атомами и молекулами, которые описывает физика атомов

- b. Потому что химики и физики работают в одних и тех же зданиях
 - c. Потому что химия старше физики
 - d. Потому что химии не нужны никакие опыты
3. Зачем вообще нужна модель атома?
- a. Потому что атом всё время меняет форму
 - b. Потому что модель доказывает, что электроны — планеты
 - c. Потому что атом слишком мал, чтобы показать его напрямую, а картина объясняет то, что мы наблюдаем
 - d. Потому что модель всегда точно верна в любом случае
4. Что происходит с теорией, если опыт показывает, что одно из её предсказаний неверно?
- a. Её оставляют без изменений, ведь теории никогда не ошибаются
 - b. Она становится законом
 - c. Она превращается в модель
 - d. Её отбрасывают или меняют, например сужая круг случаев, которые она охватывает

Ответы

1. **b)** Печь греет этими волнами еду, а томограф строит изображение мозга, достаточно точное, чтобы найти опухоль.
2. **a)** Химия изучает, как атомы и молекулы ведут себя вместе, поэтому она опирается на физику атомов.
3. **c)** Никто не может увидеть, как вращается электрон, но картина помогает объяснить то, что мы видим, например цвета, которыми

светится горячий газ.

4. d) Теория — проверенное объяснение; когда предсказание не сбывается, теорию отбрасывают или поправляют.

Задачи

1. Книга перечисляет много областей, которые стоят на физике. Выберите две из них и для каждой опишите одно, что там делает физика.

Подсказка: Подумайте о геологии, архитектуре или медицине.

Ответ: Например, в геологии физику используют, чтобы определять возраст пород по их естественной радиоактивности и изучать землетрясения; в медицине она даёт рентген, магнитно-резонансную томографию и ультразвуковые измерения кровотока.

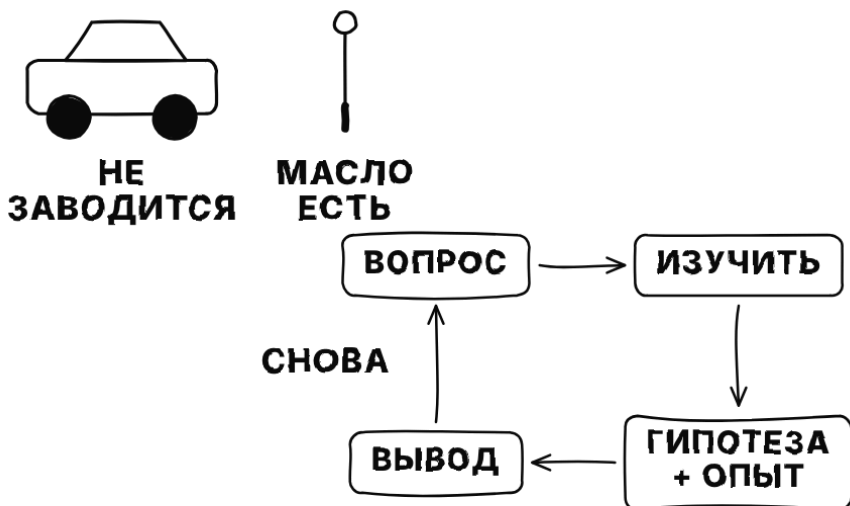
2. Объясните своими словами, что такое модель и почему планетарная картина атома полезна, хотя никто не может увидеть, как движется электрон.

Подсказка: Спросите себя, для чего нужна модель и что она позволяет объяснить из того, что мы действительно наблюдаем.

Ответ: Модель — это изображение чего-то слишком трудного или невозможного для прямого показа; она опирается на данные, но работает только в определённых пределах. Планетарная картина атома помогает объяснить то, что мы видим, например особые цвета света, которые испускает горячий газ.

Законы, теории и машина, которая не заводится

Холодное утро, вы поворачиваете ключ, а машина не заводится. Никто не стоит долго беспомощно; вы начинаете думать, почему, и строить догадки. Может быть, в двигателе нет масла. Вы поднимаете капот, вытаскиваете щуп и смотрите: масло ровно там, где ему положено быть. Эта догадка отпадает, и вы переходите к следующей — может быть, аккумулятор. Без всякого белого халата вы только что сделали то, что делают учёные.



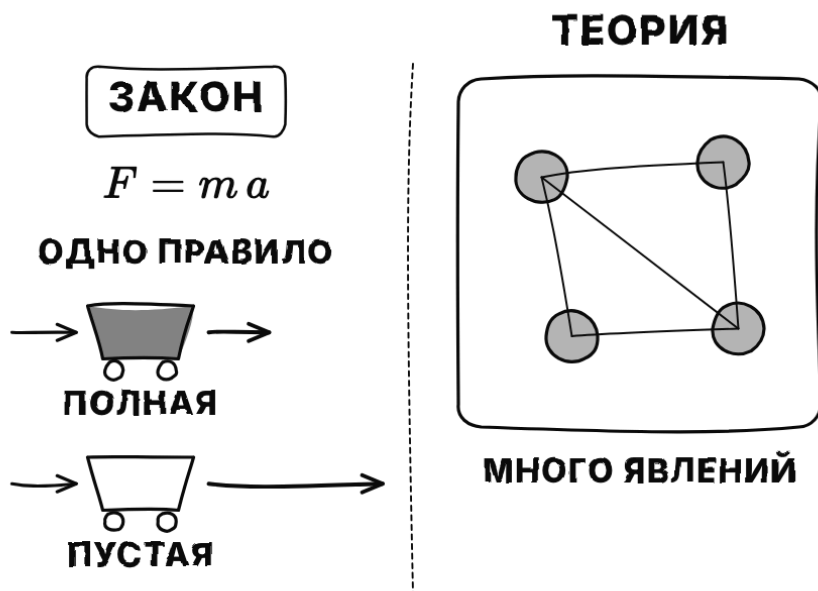
Метод как круг

Книга называет это научным методом и описывает его в несколько шагов. Вы что-то замечаете и задаёте об этом вопрос. Вы разбираетесь, что может за этим стоять. Вы предлагаете возможное объяснение, гипотезу, а затем проверяете её опытом. Наконец вы смотрите, что показала проверка, и делаете вывод; если догадка не подтвердилась, как с маслом, вы выдвигаете новую и проходите круг снова. Метод нужен не только в науке; он годится для многих бытовых загадок, и его можно подстроить под задачу.

У такого способа работы долгая история. Тысячу лет назад в Каире учёный по имени Ибн аль-Хайсам добился больших успехов в понимании света и того, как мы видим. Он сделал и нечто ещё более важное: он призывал учёных быть готовыми отбросить то, чему их учили, быть врагом всего, что они читают, и доверять только тому, что можно проверить. Он настаивал на том, чтобы проверять снова и снова, и предупреждал, что наши чувства и наши собственные ожидания могут нас обмануть. Его образ мыслей был ранней формой метода, которым мы пользуемся сегодня.

Из всех этих проверок вырастают два вида утверждений, на которые опираются учёные: законы и теории. И те и другие вырастают из проверенных гипотез, и те и другие подкреплены данными, но они различаются размером и формой. Закон короткий и очень общ: одно краткое утверждение о закономерности в природе, подтверждённое повторными опытами и часто записанное одним уравнением. Один пример — закон, который вы уже знаете: энергия ни в каком процессе не теряется, а лишь меняет форму. Другой — второй закон движения Ньютона, который связывает толчок, приложенный к

телу, количество вещества в нём и то, как быстро меняется его скорость. Толкните полную тележку в супермаркете и пустую с одинаковой силой — пустая разгонится гораздо сильнее; закон Ньютона точно говорит, как связаны толчок, масса и изменение скорости.

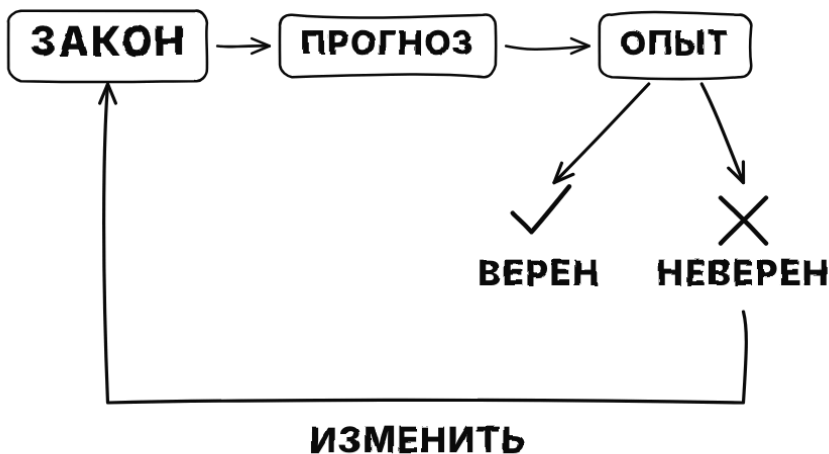


Закон и теория

Теория, как мы видели, — хорошо проверенное объяснение, но она гораздо больше закона. Её нельзя уместить в одну строку; теория эволюции и теория относительности — примеры, слишком богатые, чтобы называться законами. Проще всего их различать так: закон описывает один вид действия, а теория объясняет целое семейство связанных явлений. И если закон — отправная точка, на которой строится научный метод, то теория

— то, к чему этот долгий процесс в итоге приходит. Правила, которые действуют лишь в узких условиях, обычно называют принципами, например одно, верное только для жидкостей и газов, хотя где кончается закон и начинается принцип, часто говорят нестрого.

Законы и теории — не просто аккуратные сводки старых фактов. Часто, как только закон или теория появились, они указывают учёным на то, чего ещё никто не находил, иногда даже на предмет или событие, которых никогда не видели. Такие предсказания — одни из величайших побед науки, и они возможны только потому, что Вселенная в глубине упорядочена. Но если опыт не подтверждает предсказание, закон или теория неверны, какими бы изящными или удобными они ни были.



Верен, пока не опровергнут

Это значит, что ни один закон нельзя знать с полной уверенностью, потому что никто не может поставить все возможные опыты во всех возможных условиях. Поэтому физики считают законы и теории верными, пока им что-нибудь не противоречит. Если тщательный опыт, который могут повторить другие, идёт вразрез с хорошо установленным законом, закон приходится изменить или отбросить совсем. Это снова как с машиной: догадка про масло выглядела разумной, пока щуп не показал иное, и тогда от неё пришлось отказаться. Книга сравнивает науку с плаванием в неизведанном океане: делаются открытия, складываются законы и теории, и мир кажется прекраснее благодаря тому, что мы узнали.

Запомним

Научный метод — это круг: заметить и спросить, разобраться, выдвинуть гипотезу, проверить, сделать вывод и попробовать снова, если догадка не подтвердилась. Закон — короткое общее утверждение об одной закономерности в природе, часто одно уравнение; теория — большое объяснение целого семейства явлений. Законы и теории могут предсказывать то, чего никогда не видели, но несбывшееся предсказание доказывает, что они неверны. Ни один закон не бывает окончательно достоверным; каждый верен лишь до тех пор, пока надёжный опыт ему не противоречит.

Вопросы

1. Что делать в примере с машиной, когда оказалось, что с маслом всё в порядке?
 - a. Решить, что с машиной всё хорошо
 - b. По-прежнему считать причиной масло
 - c. Предложить новое объяснение и тоже его проверить
 - d. Остановиться, потому что метод не сработал
2. В чём самое ясное различие между законом и теорией?
 - a. Закон описывает один вид действия; теория объясняет целое семейство связанных явлений
 - b. Закон — догадка, а теория доказана

- c. Теория всегда короче закона
 - d. Данными подкреплены только теории
3. Почему ни один закон природы нельзя знать с полной уверенностью?
- a. Потому что законы со временем меняют смысл
 - b. Потому что учёные спорят о каждом законе
 - c. Потому что законы — это лишь мнения
 - d. Потому что никто не может поставить все возможные опыты во всех возможных условиях
4. Что Ибн аль-Хайсам добавил к тому, как делается наука?
- a. Он сказал, что учёные должны доверять написанному в старых книгах
 - b. Он сказал, что учёные должны доверять только проверенным данным и проверять снова и снова
 - c. Он сказал, что наши чувства никогда не ошибаются
 - d. Он сказал, что опыты не нужны, когда закон уже записан

Ответы

1. **c)** Когда гипотеза не выдерживает проверки, вы выдвигаете новую и снова проходите круг.
2. **a)** Оба проверены и подкреплены данными, но закон кратко формулирует одну закономерность, а теория объясняет многие связанные.
3. **d)** Закон можно проверить только в испытанных случаях, поэтому он верен, пока надёжный опыт ему не противоречит.
4. **b)** Он призывал учёных быть врагом прочитанного, опираться на данные, повторять проверки и помнить, что чувства и ожидания могут

обмануть.

Разобранные примеры

Машина, которая не заводится Вы пытаетесь завести машину, а она не заводится. Проверьте научным методом мысль, что в двигателе нет масла.

Заметить и спросить: машина не заводится — почему?

Разобраться: выяснить, по каким разным причинам машина может не заводится.

Выдвинуть гипотезу: может быть, в двигателе нет масла.

Проверить: открыть капот и посмотреть уровень масла; он в норме.

Сделать вывод: дело не в масле, значит, выдвинуть новую гипотезу и повторить процесс.

Ответ: Проверка исключает масло, и поиск продолжается с новой гипотезой.

Задачи

1. Ваш телефон вдруг перестал заряжаться. Опишите, как вы применили бы научный метод, чтобы выяснить почему, — хотя бы с одной гипотезой и проверкой для неё.

Подсказка: Начните с вопроса, затем выберите одну возможную причину, которую можно проверить.

Ответ: Вопрос: почему телефон не заряжается? Гипотеза: неисправен кабель. Проверка: взять другой кабель, который работает с другим устройством. Если телефон теперь заряжается, гипотеза подтверждается; если нет, кабель исключён, и вы пробуете новую гипотезу, например зарядное устройство или розетку.

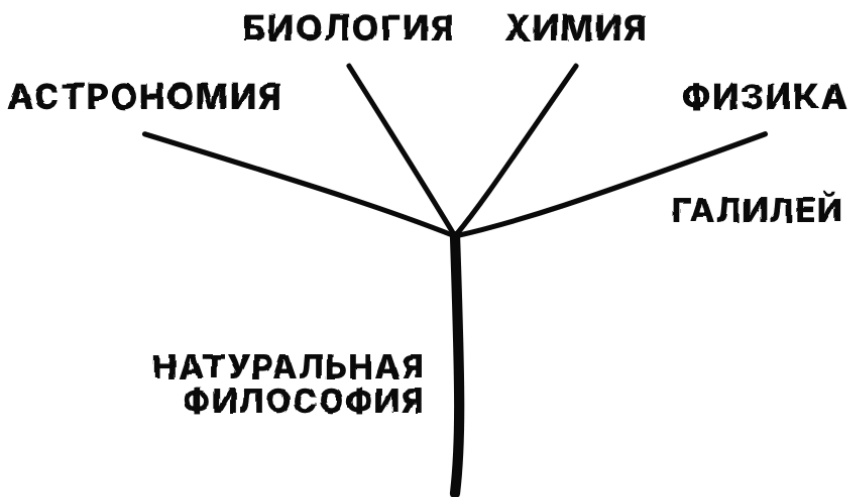
2. У учёного красивая, удобная теория, но тщательный опыт, который могут повторить другие, не подтверждает её предсказание. Что, по словам книги, должно произойти и почему?

Подсказка: Спросите себя, что важнее в науке: изящество или опыт.

Ответ: Теория неверна, и её нужно изменить или отбросить, какой бы изящной или удобной она ни была. Последнее слово за опытом, и законы и теории верны лишь до тех пор, пока надёжный опыт им не противоречит.

Когда обычные правила кончаются

Подбросьте связку ключей из одной руки в другую. Вы не задумываясь знаете, примерно куда они упадут; ваш мозг предсказывает такие полёты с самого детства. Правила физики, записанные столетия назад, предсказывают ту же дугу почти идеально. Но перенесите те же правила внутрь атома или к зонду, пролетающему вблизи Солнца, и они начнут давать неверные ответы. Как правила, которые так хорошо работают у вас в руке, могут отказывать там? Книга отвечает, рассказывая, как выросла физика.



Натуральная философия ветвится

Большую часть истории физика не была отдельным предметом. Само слово происходит от греческого слова «природа», а изучение природы называлось натуральной философией. С древности до эпохи Возрождения натуральная философия объединяла всё: астрономию, биологию, химию, физику, математику и медицину. Пример книги — греческий мыслитель Аристотель; он писал о физике, но и о животных, о душе, о политике и о поэзии, и всё это как части одного великого исследования.

Когда за последние несколько столетий знания накопились, ни один человек уже не мог охватить их все, и натуральная философия разветвилась на отдельные области. Физика сохранила самую основную часть, поэтому, как мы видели, другие науки и сегодня на неё опираются. Книга чтит двух людей, которые продвигали эту перемену: Ибн аль-Хайсама, с которым мы познакомились как с ранним поборником проверки, и Галилея; оба так много значили для математики, оптики, физики и астрономии, что позднейший учёный поместил их обоих на обложку своего главного труда. Представьте семейное дело, выросшее в большую компанию: сначала один человек делал всё, потом образовались отдельные отделы, но исходное ядро по-прежнему держит их вместе.

Физику, выросшую с эпохи Возрождения до конца девятнадцатого века, называют классической физикой. В начале двадцатого века ряд революционных открытий превратил её в то, что мы называем современной физикой. Классическая физика — не совершенное описание Вселенной, но отличное приближение, пока выполняются три условия. Тела должны двигаться медленнее примерно одного процента скорости света; они

должны быть достаточно велики, чтобы их можно было увидеть в микроскоп; и тяготение должно быть слабым, как земное.

Машина на шоссе, самолёт, даже ракета, летящая к Луне, — все движутся намного медленнее этого предела, поэтому классические правила описывают их очень хорошо.

КЛАССИКА

СКОРОСТЬ $< 1\%$ c



РАЗМЕР $>$ МИКРОСКОП

✓ СОВРЕМЕННАЯ

СЛАБАЯ ГРАВИТАЦИЯ



✗ АТОМЫ ЗОЛОТА

Где работает классическая физика

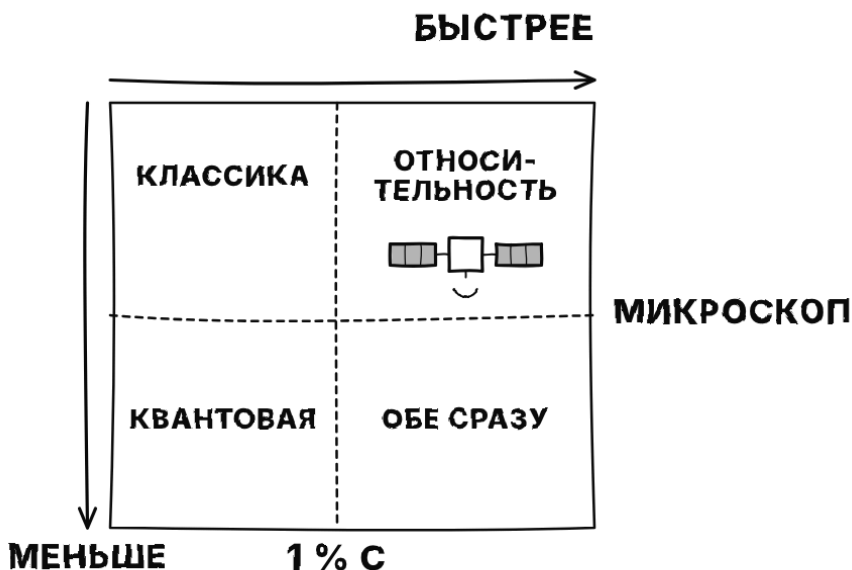
Мы, люди, живём целиком внутри этих условий, и поэтому классическая физика кажется здравым смыслом, а многое в современной физике — странным. Именно здесь модели и приносят пользу: они позволяют представить то, чего мы никогда не испытываем, например тела, несущиеся с огромными скоростями, или вещи, слишком малые для наших чувств. Мы можем понять атом, потому что можем его вообразить, хотя

никто никогда не видел атома невооружённым глазом. Помогают и новые инструменты: с особым микроскопом, который ощупывает поверхность, учёные теперь могут действительно увидеть отдельные атомы, из которых состоит лист золота, выстроенные, как апельсины, уложенные в ящик.

Современная физика принесла одни из самых впечатляющих успехов во всей науке. Многие классические законы пришлось изменить или отбросить, и в результате преобразились техника, общество и наша картина Вселенной. Как и научная фантастика, современная физика полна странных объектов, далёких от повседневной жизни, но в отличие от фантастики она реальна.

Она стоит на двух революционных теориях. Теория относительности нужна всякий раз, когда что-то движется быстрее примерно одного процента скорости света или находится в сильном поле тяготения, как вблизи Солнца.

Квантовая механика нужна для всего, что слишком мало, чтобы увидеть в микроскоп. Спутники, ставящие синюю точку на карту в вашем телефоне, — реальный случай, когда обычных правил не совсем хватает: как мы слышали, время для них идёт чуть иначе, и системе приходится это учитывать.



Какая теория где

Соедините две теории — и получите релятивистскую квантовую механику, которая справляется с крошечными телами, движущимися очень быстро или находящимися в сильном тяготении. Это лучшая универсальная теория, какая у нас есть, но она так сложна математически, что учёные пользуются ею только по необходимости, а более простыми теориями — всякий раз, когда их точности достаточно. Так почему же книга уделяет больше всего времени классической физике? По двум причинам: она с большой точностью описывает повседневную жизнь, и без неё вообще нельзя понять современную физику. Книга добавляет ободряющее замечание: удивительно много в современной физике можно сделать с обычной школьной математикой.

Она заканчивается небольшой проверкой пройденного. Если друг говорит, что узнал новый закон природы, вы уже кое-что знаете, прежде чем он скажет ещё слово: это будет краткое утверждение о правиле, которому природа всегда следует. Если же он говорит, что узнал теорию, можно ждать чего-то гораздо более широкого — объяснения, охватывающего целый круг связанных явлений.

Запомним

Физика выросла из натуральной философии, единого великого изучения природы, которое разветвилось на отдельные науки, и физика сохранила самую основную часть. Классическая физика работает превосходно, пока тела медленнее примерно одного процента скорости света, достаточно велики, чтобы увидеть их в микроскоп, и находятся в слабом тяготении. За этими пределами нужна современная физика: теория относительности — для очень быстрого и сильного тяготения, квантовая механика — для очень малого. Модели позволяют представить этот непривычный мир, а новые микроскопы могут даже показать отдельные атомы. Классическая физика остаётся в центре книги, потому что она так хорошо описывает повседневную жизнь и на ней построена современная физика.

Вопросы

1. Почему классическая физика кажется нам здравым смыслом?
 - a. Потому что это была первая физика из когда-либо записанных
 - b. Потому что она совершенно точно описывает всю Вселенную
 - c. Потому что мы живём там, где тела медленны, достаточно велики, чтобы их видеть, и тяготение слабое, — а именно там она и работает
 - d. Потому что современная физика оказалась неверной
2. Какая теория нужна, чтобы описать электрон внутри атома?
 - a. Квантовая механика, потому что электрон слишком мал, чтобы увидеть его в микроскоп
 - b. Теория относительности, потому что у атома сильное тяготение
 - c. Классическая физика, потому что атомы движутся медленно
 - d. Никакая, потому что электроны изучать нельзя
3. Почему книга уделяет больше всего времени классической физике?
 - a. Потому что современная физика — это лишь научная фантастика
 - b. Потому что классическая физика точнее теории относительности
 - c. Потому что от релятивистской квантовой механики отказались

- d. Потому что она очень точно описывает повседневную жизнь и нужна, чтобы понять современную физику
4. Что произошло с натуральной философией по мере роста знаний?
- a. Она осталась одним предметом, который преподаёт один учитель
 - b. Она разветвилась на отдельные области, и физика сохранила самую основную часть
 - c. Её целиком заменила медицина
 - d. Она превратилась в научную фантастику

Ответы

1. c) Мы живём целиком внутри условий, где классическая физика — отличное приближение, поэтому она совпадает с нашим опытом.
2. a) Квантовая механика нужна для всего, что слишком мало, чтобы увидеть в микроскоп.
3. d) Классическая физика с большой точностью подходит к повседневной жизни, и без неё современную физику не понять.
4. b) За последние несколько столетий натуральная философия разделилась на отдельные науки, и физика сохранила самую основную часть.

Задачи

1. Друг говорит, что узнал о новом законе природы. Что вы можете знать о нём, ещё до того как он его опишет, и что было бы иначе, если бы он узнал теорию?

Подсказка: Вспомните, что такое любой закон и что такое любая теория.

Ответ: Любой закон будет кратким описанием правила, которому следуют все природные процессы. Теория же была бы широким, применимым во многих случаях объяснением, охватывающим целый круг связанных явлений.

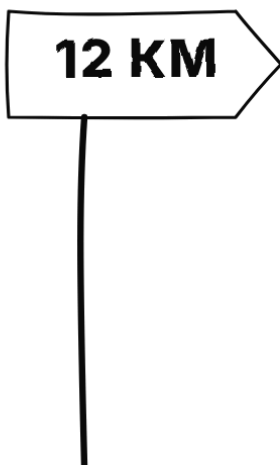
2. Для каждого случая скажите, хватает ли обычных классических правил или какая современная теория нужна: машина на шоссе; зонд, пролетающий вблизи Солнца; внутренность атома.

Подсказка: Проверьте три условия: медленно по сравнению со светом, достаточно велико для микроскопа, слабое тяготение.

Ответ: Машина: классическая физика, потому что она медленная, видимая и в слабом тяготении. Зонд вблизи Солнца: теория относительности из-за сильного тяготения Солнца. Внутренность атома: квантовая механика, потому что она слишком мала, чтобы увидеть её в микроскоп.

Двенадцать чего?

Представьте, что друг объясняет вам по телефону дорогу: «Иди прямо двенадцать, потом налево». Двенадцать чего? Двенадцать шагов, двенадцать кварталов, двенадцать миль? Одно число хуже, чем бесполезно: оно звучит как помощь и ничего не сообщает. Книга показывает то же самое карикатурой с указателем, расстояния на котором даны в неизвестных единицах, и называет такие числа досадно бесполезными. С этого и начинается измерение в физике: число что-то значит только вместе со своей единицей.



12 ШАГОВ

-

12 КВАРТАЛОВ

—

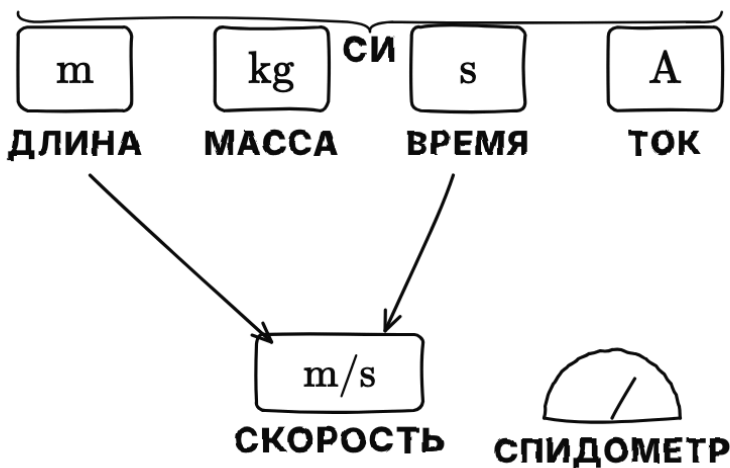
12 МИЛЬ

—————

Двенадцать чего?

А физике нужно очень много чисел. Она имеет дело с тем, что длится невообразимо короткий миг, как жизнь атомного ядра, и с тем, что старо, как Земля. Она имеет дело с частицами намного меньше атома и с расстояниями до края известной Вселенной; с крошечным толчком прыгающей блохи и с огромным притяжением между Землёй и Солнцем. Даже расстояние до Луны, которое кажется огромным, — лишь крошечный шаг по сравнению с расстояниями до других небесных тел. Если выражать такие вещи числами, а не только описывать словами, природу можно понять гораздо глубже, но только если все договорились о единицах.

Здесь природа снова показывает свою простоту. Почти всё, что измеряет физика, можно построить всего из четырёх основных величин: длины, массы, времени и силы электрического тока. Одни величины определяют, говоря, как их измерить, — так мы измеряем расстояние линейкой или время часами. Другие определяют, говоря, как их вычислить из этих измерений; средняя скорость, например, — это пройденное расстояние, делённое на затраченное время. Спидометр в вашей машине непрерывно делает это вычисление за вас, превращая расстояние и время в одно число на шкале.



Четыре основные, много производных

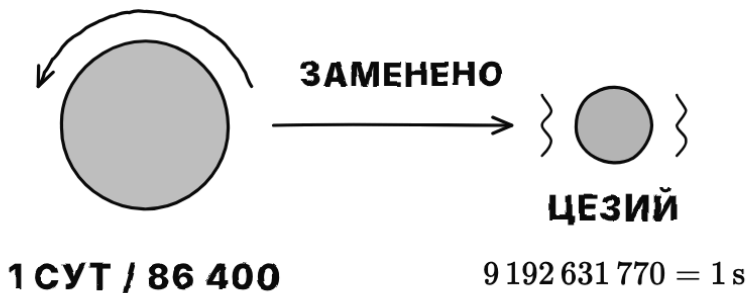
Единица — это условленное, стандартное количество. Длину дистанции можно дать в метрах для спринтеров или в километрах для бегунов на длинные дистанции; это та же величина, просто единица более удобного размера. В мире используются две системы единиц. Одна — метрическая система, известная как СИ по её французскому названию; ею пользуется практически каждая страна, и это система, о которой договорились учёные всего мира. Другая — более старая английская, или имперская, система дюймов, футов и миль, унаследованная от Британской империи и до сих пор широко используемая в Соединённых Штатах. Книга придерживается СИ, а там, где она пользуется привычной посторонней единицей,

например миллиметрами ртутного столба, в которых измеряют давление крови, она всегда связывает её с СИ.

Четыре основные единицы — метр для длины, килограмм для массы, секунда для времени и ампер для силы электрического тока, до которого книга дойдёт гораздо позже. Их называют основными, потому что их можно определить, только описав, как их измеряют. Все остальные единицы строятся из них и называются производными: единица скорости, например, — это длина, делённая на время. Когда приложение погоды показывает ветер в километрах в час, оно пользуется производной единицей, составленной из длины и времени.

Возьмём секунду, единицу времени. Много лет её определяли как постоянную долю средних суток, одну восемьдесят шесть тысяч четырёхсотую. Но вращение Земли очень медленно замедляется, поэтому сутки постепенно удлиняются, и единица, привязанная к ним, незаметно менялась бы. Поэтому учёные нашли то, что никогда не меняется: атомы цезия можно заставить колебаться чрезвычайно равномерно, и эти колебания можно наблюдать и считать. С 1967 года одна секунда — это время, за которое происходит чуть больше девяти миллиардов таких колебаний, точное, неизменное число. Часы, построенные на этом, называемые атомными часами, идут с точностью лучше миллионной доли секунды за целый год; одни из них, если смотреть сверху, — башня высотой почти десять метров. Часы в вашем телефоне регулярно сверяются с сетями, которые опираются на атомное время, поэтому они совпадают с часами всех остальных до секунды.

ЗАМЕДЛЯЕТСЯ



От суток к цезию

Зачем столько хлопот из-за одной единицы? Потому что каждое измерение в физике в конечном счёте выражается через основные единицы, и ни одно измерение не может быть точнее единиц, на которые оно опирается. Неустойчивая секунда сделала бы неустойчивым каждый отсчёт времени, а неустойчивый метр — каждое расстояние.

Запомним

Число без условленной единицы ничего не сообщает. Почти всё в физике можно построить из четырёх основных величин: длины, массы, времени и силы электрического тока, измеряемых в метрах, килограммах, секундах и амперах. Каждая другая единица, например единица скорости, — производная единица, составленная из них. Большая часть мира и вся наука пользуются метрической системой, СИ. Секунду теперь определяют, считая равномерные колебания атомов цезия в атомных часах, потому что сами сутки медленно удлиняются.

Вопросы

1. Почему среднюю скорость называют производной величиной, а не основной?
 - a. Потому что её вычисляют из двух измерений — расстояния и времени
 - b. Потому что её можно измерить только спидометром
 - c. Потому что её придумали после метра
 - d. Потому что у неё вообще нет единицы
2. Почему секунду привязали к атомам цезия, а не к длительности суток?
 - a. Потому что цезий легче купить, чем календарь
 - b. Потому что сутки различаются только летом и зимой

- c. Потому что вращение Земли медленно замедляется, и сутки постепенно удлиняются
 - d. Потому что сутки были слишком короткими, чтобы их делить
- 3. Почему так важно, чтобы основные единицы были очень точными?
 - a. Потому что производные единицы от них не зависят
 - b. Потому что каждое измерение в конце концов выражается через них и не может быть точнее их
 - c. Потому что ими пользуются только учёные
 - d. Потому что они меняются каждый год
- 4. Что из этого — одна из четырёх основных величин?
 - a. Скорость
 - b. Сила
 - c. Электрический заряд
 - d. Масса

Ответы

- 1. a) Среднюю скорость определяют через то, как её вычислить, — пройденное расстояние, делённое на затраченное время, поэтому её единица построена из длины и времени.
- 2. c) Единица, привязанная к удлиняющимся суткам, незаметно менялась бы; колебания цезия остаются совершенно равномерными.
- 3. b) Все измерения опираются на основные единицы, поэтому неустойчивая единица сделала бы неустойчивым всё, что на ней построено.

4. d) Четыре основные величины — длина, масса, время и сила электрического тока; скорость, сила и заряд строятся из них.

Задачи

1. На указателе написано только «Станция 3». Объясните, почему это не полезное измерение и что сделало бы его таким.

Подсказка: Спросите, что считает это число.

Ответ: Число без единицы ничего не сообщает: 3 может означать метры, километры или мили. Добавьте условленную единицу, например «3 километра», — и получится измерение, которое любой может понять и сравнить.

2. Разделите на основные и производные единицы и объясните каждую: секунда, единица скорости вроде километров в час, килограмм, метр.

Подсказка: Основная единица определяется тем, как её измеряют; производная строится из других.

Ответ: Секунда, килограмм и метр — основные: каждая определяется тем, как её измеряют. Километры в час — производная единица: это длина, делённая на время.

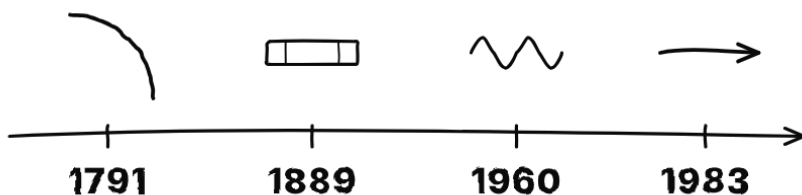
Метр из света, килограмм из постоянных

Возьмите рулетку и вытяните ровно один метр. Откуда вы знаете, что фабрика нанесла деления в нужных местах? Оттуда, что её ленту сверили с лучшей, а ту — с ещё лучшей, и так вверх по всей цепочке. На самом верху этой цепочки должно быть что-то, что определяет, что такое метр. История того, что стоит на вершине, и есть история этой части.



1 m

ЗЕМЛЯ ЭТАЛОН КРИПТОН СВЕТ

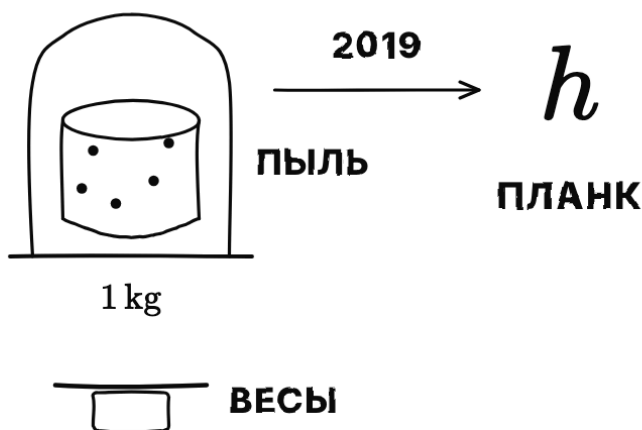


Четыре метра в истории

Первый метр, в 1791 году, был кусочком самой Земли: одной десятиmillionной расстояния от экватора до Северного полюса. В 1889 году он стал тем, что можно подержать в руках: расстоянием между двумя тонкими штрихами, нанесёнными на брусок из платины и иридия, который хранится под Парижем. К 1960 году учёные научились лучше, и метр переопределили как определённое число длин волн оранжевого света, который испускают атомы криптона, чуть больше полутора миллионов. С 1983 года метр определяется самим светом: это расстояние, которое свет проходит в пустоте за крошечную точную долю секунды, одну часть из почти трёхсот миллионов. Такой выбор закрепляет скорость света как точное число метров в секунду. Каждый шаг делал метр точнее и уводил его от предметов, которые могут истереться, погнуться или потеряться.

Килограмм прошёл похожий путь, только позже. Больше века он был маленьким цилиндром из платины и иридия, хранившимся вместе со старым эталоном метра в Международном бюро мер и весов под Парижем. Точные копии хранились в других местах, например в национальном институте стандартов неподалёку от Вашингтона, и любая масса на Земле в конечном счёте восходила к сравнению с этим цилиндром. Килограмм, напечатанный на пакете муки или показанный кухонными весами, был в конечном счёте обещанием, что он совпадает с тем единственным куском металла. Цилиндр не ржавел, но крошечные частицы грязи из воздуха всё же приставали к его поверхности и очень медленно меняли его массу. Эталон, который дрейфует, — плохой эталон, поэтому в мае 2019 года учёные приняли более устойчивое определение: килограмм теперь определяется через секунду,

метр и постоянную Планка, неизменное число квантовой физики, которое связывает энергию света с его частотой.



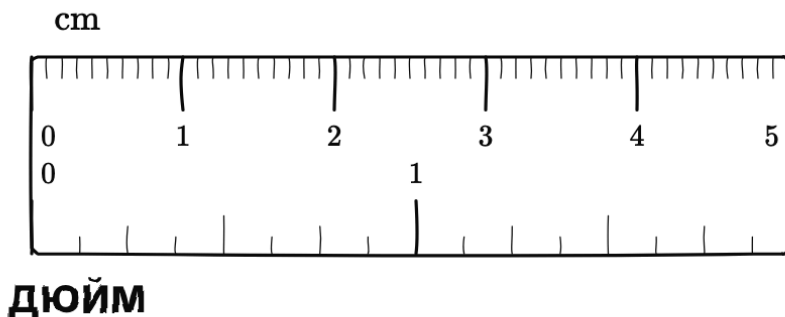
Килограмм покидает цилиндр

Четвёртая основная единица, ампер для силы электрического тока, подождёт глав об электричестве. Первым главам, о движении, жидкостях, теплоте и волнах, не нужно ничего, кроме длины, массы и времени.

За всеми этими переменами стоит общее желание физиков. Раз всё состоит из крошечных частей, лучше всего было бы строить каждый эталон на этих крошечных частях и на неизменных свойствах природы, вроде скорости света, а не на предметах в хранилище. Время уже опирается на колебания атомов цезия, а

длина, когда-то привязанная к свету атомов криптона, теперь опирается на скорость света. Книга упоминает, что массу однажды тоже могут привязать к атомам, например измерив чрезвычайно совершенный шар из атомов кремния, а электрический заряд однажды может опереться на заряд отдельных электронов и протонов.

Теперь вторая большая мысль этой части: метрическая система считает десятками. В метре сто сантиметров, а в километре тысяча метров, поэтому переход от единицы к единице — это лишь перенос запятой. Старая американская система далеко не так опрятна: двенадцать дюймов в футах и пять тысяч двести восемьдесят футов в миле.

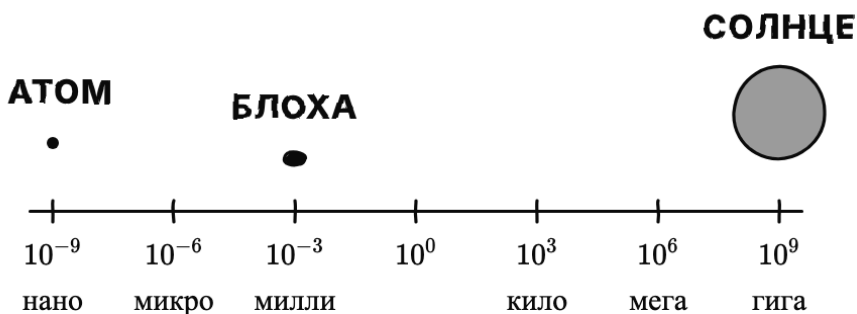


Десятки против дюжин

Опыт

Посмотрите на линейку с делениями в сантиметрах и в дюймах. На метрической стороне каждое десятое мелкое деление — крупное, поэтому миллиметры, сантиметры и метры читаются с одного взгляда. На дюймовой стороне дюйм разделён на половины, четверти, восьмые и шестнадцатые, и перевод дюймов в футы или мили требует настоящей арифметики.

Второе преимущество в том, что одна единица может охватить любой размер, если поставить перед ней короткое слово, называемое приставкой. Кило значит в тысячу раз больше, санти — сотая доля, милли — тысячная, микро — миллионная, нано — миллиардная; на большом конце стоят мега, гига и тера — миллион, миллиард и триллион. Таблица в книге сопровождает каждую приставку картинкой: миллиметр — примерно высота блохи в холке, сантиметр — толщина кончика пальца, километр — около шести десятых мили, нанограмм — маленькая пылинка, фемтометр — размер протона. Так строители работают в метрах, лётчики — в километрах, а конструкторы линз — в нанометрах, и никому не приходится придумывать новую единицу для своего ремесла. Память вашего телефона в гигабайтах и доза лекарства в миллиграммах — тот же приём: одна единица, растянутая приставкой.



Приставки по степеням десяти

Счёт десятками даёт ещё и быстрое чувство масштаба, называемое порядком величины: примерный размер числа. Восемьсот и четыреста пятьдесят — разные числа, но оба «сотни», поэтому у них один порядок величины. Атом имеет в поперечнике около десятимиллиардной доли метра, а Солнце — около миллиарда метров; разница в порядке величины сразу говорит, как далеко друг от друга эти миры.

Запомним

Метр начинался как кусочек Земли, потом стал металлическим бруском, потом числом световых волн, а теперь это расстояние, которое свет проходит за крошечную точную долю секунды. Килограмм был металлическим цилиндром под Парижем до 2019 года; теперь он определяется через секунду, метр и постоянную Планка. Физики хотят, чтобы каждый эталон опирался на мельчайшие части природы и неизменные постоянные. Метрическая система считает десятками, а приставка вроде кило, милли или нано растягивает одну единицу на любой размер. Порядок величины — быстрое, примерное представление о том, насколько что-то велико.

Вопросы

1. Почему в 2019 году старый металлический килограмм заменили?
 - a. Потому что он сильно заржавел
 - b. Потому что к нему приставали крошечные частицы грязи из воздуха и медленно меняли его массу
 - c. Потому что он был слишком мал, чтобы его видеть
 - d. Потому что его перевезли из Парижа в Вашингтон
2. На чём основан метр сегодня?
 - a. На расстоянии от экватора до Северного полюса

- b. На двух штрихах на металлическом бруске под Парижем
 - c. На расстоянии, которое свет проходит в пустоте за крошечную точную долю секунды
 - d. На размере атома криптона
3. Почему переходить от одной метрической единицы к другой так легко?
- a. Потому что метрические единицы идут шагами в десять раз, и нужно лишь перенести запятую
 - b. Потому что метрические единицы вообще не нужно переводить
 - c. Потому что метрическая единица всего одна
 - d. Потому что метрические числа всегда круглые
4. Почему физики хотели бы, чтобы каждый эталон опирался на атомы и постоянные природы?
- a. Потому что атомы дешевле металлических брусков
 - b. Потому что предметы в хранилище легче измерять
 - c. Потому что постоянные природы медленно меняются со временем
 - d. Потому что мельчайшие части природы и неизменные постоянные не изнашиваются, не дрейфуют и не теряются

Ответы

1. **b)** Эталон, который дрейфует, — плохой эталон, поэтому килограмм переопределили через неизменные постоянные.
2. **c)** С 1983 года метр определяется светом, и это же точно закрепляет скорость света.

3. а) Сто сантиметров составляют метр, а тысяча метров — километр, в отличие от двенадцати дюймов в футе.

4. д) Если строить эталоны на крошечных частях и неизменных свойствах вроде скорости света, удаётся избежать дрейфа физических предметов.

Задачи

1. С помощью приставок скажите, сколько миллиграммов в грамме и сколько метров в километре, и объясните, почему метрическая система делает такие вопросы лёгкими.

Подсказка: Милли значит тысячная доля, а кило — в тысячу раз больше.

Ответ: В грамме тысяча миллиграммов, а в километре тысяча метров. Поскольку каждая приставка — степень десяти, перевод сводится к переносу запятой, в отличие от дюймов, футов и миль.

2. Расставьте по порядку величины от меньшего к большему, пользуясь примерами книги: сантиметр, фемтометр, километр, миллиметр.

Подсказка: Фемто здесь самая маленькая приставка, кило — самая большая.

Ответ: Фемтометр (примерно размер протона), миллиметр (блоха в холке), сантиметр (толщина кончика пальца), километр (около шести десятых мили).

От протона до края Вселенной

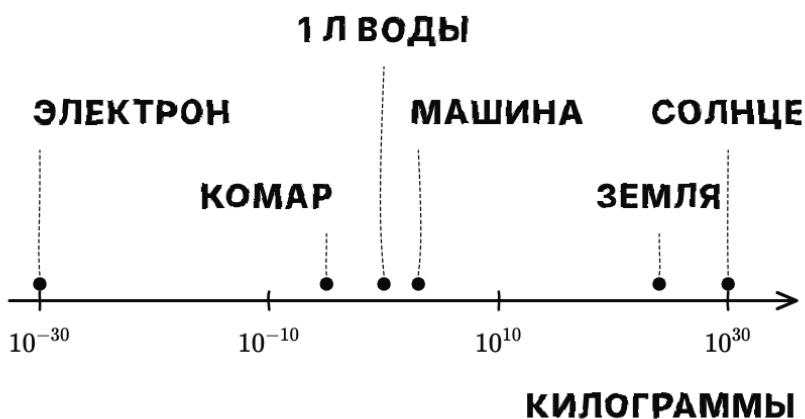
Возьмите одну песчинку и положите её на кончик пальца. Она около миллиметра в поперечнике, тысячная доля метра. А теперь попробуйте представить нечто в триллион раз меньше: примерно таков размер протона, ядра атома водорода. И теперь нечто настолько огромное, что свету, самому быстрому, что есть на свете, нужны миллиарды лет, чтобы его пересечь: известная Вселенная. Физика говорит обо всём этом, и первая задача книги в этой части — просто дать этому размаху уложиться в голове.



Лестница длин

Она делает это длинной таблицей известных длин, масс и времён, каждая из которых дана лишь приблизительно, как порядок величины. Читайте длины сверху вниз — и вы поднимаетесь по лестнице. Внизу — самая мелкая подробность, какую сегодня может различить любой опыт, затем протон, ядро атома урана, атом водорода, тонкая оболочка живой клетки и длина волны видимого света. Затем идёт то, что можно увидеть: песчинка, четырёхлетний ребёнок ростом около метра, футбольное поле длиной около ста метров и самая глубокая точка океана, около десяти километров вниз. Затем сама Земля, расстояние до Солнца, расстояние, которое свет проходит за год, ширина нашей Галактики, расстояние до ближайшей большой галактики, Андромеды, и наконец края известной Вселенной.

Массы поднимаются так же. Внизу стоит электрон, затем атом водорода, бактерия, комар и колибри. В середине литр воды весит около килограмма, человек — около ста килограммов, машина — около тысячи. Литровая бутылка воды в вашем холодильнике — удобная гиря в один килограмм, та же ступенька лестницы, которой пользуется книга. Выше идут большой корабль, большой айсберг, ядро кометы, Луна, Земля, Солнце, вся наша Галактика и на самом верху — всё известное вещество во Вселенной.



Лестница масс

И времена: миг, за который свет пересекает протон; жизнь крайне неустойчивого ядра; одно колебание световой волны; одно колебание атома в твёрдом теле; одно колебание FM-радиоволны. Затем времена человеческого масштаба: нервный импульс длиной около тысячной доли секунды, один удар сердца около секунды, сутки, год. Затем долгие: половина человеческой жизни, вся записанная история, возраст Земли и возраст Вселенной. Таблицу обрамляют две фотографии: крошечный планктон, дрейфующий среди кристаллов льда в Антарктическом море, длиной от нескольких тысячных миллиметра до двух миллиметров, и две галактики, врезающиеся друг в друга на расстоянии больше двух миллиардов световых

лет. Размах природы, говорит книга, бросает вызов воображению.

При таком множестве размеров и стольких единицах в ходу нам постоянно приходится переходить от одной единицы к другой. Европейский рецепт просит молоко в литрах, а ваш мерный кувшин показывает чашки; пешеходный маршрут даёт расстояние в футах, а вы хотите знать, сколько это миль. Инструмент для этого — переводной коэффициент: отношение, говорящее, сколько одних единиц составляют одну другую. В футах двенадцать дюймов, в метре сто сантиметров, в минуте шестьдесят секунд, в километре тысяча метров.

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

КОЭФФИЦИЕНТ

1. ЕСТЬ И НУЖНО

2. НАЙТИ МНОЖИТЕЛЬ

3. УМНОЖИТЬ, СОКРАТИТЬ

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

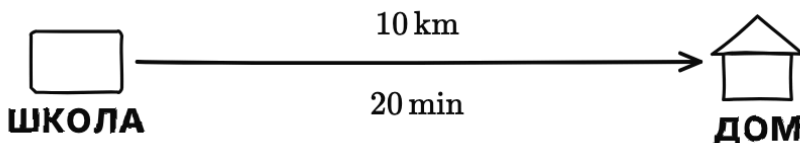
Переводной коэффициент сокращает единицы

Метод состоит из трёх шагов. Первый: запишите, какая единица у вас есть и какая нужна. Второй: найдите переводной коэффициент, который их связывает. Третий: умножьте то, что у вас есть, на этот коэффициент, расположенный так, чтобы ненужная единица сократилась и осталась нужная. Первый пример книги переводит восемьдесят метров в километры: раз тысяча метров составляет километр, метры сокращаются, и остаётся восемь сотых километра. Тот же рецепт годится для любых единиц.

Опыт

Возьмите кухонный мерный кувшин, на котором напечатаны и литры, и чашки. Налейте до отметки в один литр и прочитайте чашки — около четырёх. Этот отсчёт — ваш собственный переводной коэффициент между двумя единицами, и с ним можно переписать любой рецепт.

Затем книга разбирает настоящую поездку. Вы едете десять километров от школы до дома, и это занимает двадцать минут. С какой средней скоростью вы ехали — сначала в километрах в час, а потом в метрах в секунду? Средняя скорость — это просто расстояние, делённое на время, что даёт полкилометра каждую минуту. Чтобы перевести минуты в часы, вы пользуетесь тем, что в часе шестьдесят минут, и ответ получается тридцать километров в час. Это обычная городская скорость на спидометре вашей машины, что уже говорит о разумности ответа.



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

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

$$1 \text{ h} = 3600 \text{ s}$$



Десять километров за двадцать минут

Книга настаивает на проверке таких ответов, и это она называет анализом размерностей: пусть сами единицы следят за вычислением. Если поставить переводной коэффициент вверх ногами, единицы не сократятся; вместо этого получится странная смесь вроде километро-часов на минуту в квадрате, что явно не скорость. Поэтому вы проверяете три вещи: что единицы сократились правильно, что ответ в тех единицах, в каких спрашивали, и что он имеет смысл. Здесь так и есть: десять километров за треть часа значат тридцать километров за целый час. Книга также отмечает, что ответ записан ровно тремя цифрами, как и расстояние, и время, и что шестьдесят минут в часе вовсе этого не ограничивают, потому что час по определению равен ровно шестидесяти минутам.

Для второй половины вопроса, в метрах в секунду, нужны сразу два переводных коэффициента. Один меняет часы на секунды, поскольку в часе три тысячи шестьсот секунд, а другой меняет километры на метры. Расположить их так, чтобы обе ненужные единицы сократились, — следующий шаг, и с него начинается следующая часть.

Запомним

Физика простирается от размера протона до краёв известной Вселенной, от массы электрона до массы всего известного вещества и от времени, за которое свет пересекает протон, до возраста Вселенной. Переводной коэффициент — это отношение, говорящее, сколько одних единиц составляют другую, например тысяча метров в километре. Чтобы перевести, умножьте на коэффициент, расположенный так, чтобы ненужная единица сократилась, а нужная осталась. Анализ размерностей значит позволить единицам проверять работу: если они не сокращаются до нужных единиц, что-то стоит вверх ногами. Десять километров за двадцать минут — это тридцать километров в час, разумная городская скорость.

Вопросы

1. Как нужно расположить переводной коэффициент при переводе единиц?

- a. Так, чтобы ненужная единица сократилась, а нужная осталась
 - b. Так, чтобы большее число всегда было сверху
 - c. Так, чтобы в ответе остались обе единицы
 - d. Неважно, как его поставить
2. Что значило бы, если бы расчёт скорости закончился единицами «километро-часы на минуту в квадрате»?
- a. Что машина ехала очень быстро
 - b. Что ответ должен быть в милях
 - c. Что переводной коэффициент поставили вверх ногами
 - d. Что единицы правильные, но редкие
3. Почему шестьдесят минут в часе не ограничивают число цифр в ответе для скорости?
- a. Потому что шестьдесят — круглое число
 - b. Потому что час по определению равен ровно шестидесяти минутам, и коэффициент совершенно точен
 - c. Потому что переводные коэффициенты никогда не используются в расчётах
 - d. Потому что минуты — ненастоящие единицы
4. Почему тридцать километров в час — разумный ответ для десяти километров за двадцать минут?
- a. Потому что спидометр в городе всегда показывает тридцать
 - b. Потому что тридцать в три раза больше двадцати
 - c. Потому что десять плюс двадцать — тридцать

d. Потому что двадцать минут — треть часа, значит, за целый час вы проедете втрое больше

Ответы

1. a) Вы умножаете на коэффициент, расположенный так, чтобы ненужная единица сократилась и осталась нужная.
2. c) Перевернутый коэффициент не даёт единицам сократиться и оставляет смесь, которая явно не скорость.
3. b) Час по определению равен шестидесяти минутам, поэтому переводной коэффициент не несёт никакой погрешности.
4. d) Десять километров за треть часа значат тридцать километров за целый час.

Разобранные примеры

Восемьдесят метров в километрах Переведите 80 метров в километры.

Запишите единицу, которая у вас есть, — метры, и нужную — километры.

Найдите переводной коэффициент: 1000 метров составляют 1 километр.

Умножьте 80 метров на 1 километр на 1000 метров, чтобы метры сократились.

80, делённое на 1000, равно 0,080.

Ответ: 0,080 км

Задачи

1. Вы проезжаете 10,0 км от школы до дома за 20,0 мин. Какова ваша средняя скорость в километрах в час?

Подсказка: Сначала разделите расстояние на время, чтобы получить километры в минуту, затем используйте 60 минут в часе.

Ответ: 30,0 км/ч: 10,0 км, делённые на 20,0 мин, дают 0,500 км в минуту, а $0,500 \times 60 = 30,0$ км/ч.

2. По таблице книги расставьте по порядку от самого короткого времени к самому длинному: один удар сердца, длительность нервного импульса, сутки, возраст Земли.

Подсказка: Нервный импульс длится около тысячной доли секунды, удар сердца — около секунды.

Ответ: Нервный импульс (около тысячной доли секунды), удар сердца (около одной секунды), сутки, возраст Земли.

Близко к истине или близко друг к другу

Мы оставили нашу поездку домой недоделанной: десять километров за двадцать минут, тридцать километров в час, а теперь та же скорость в метрах в секунду. Две замены завершают дело. Час — это три тысячи шестьсот секунд, так что часы уступают место секундам; километр — это тысяча метров, так что километры уступают место метрам. Когда обе ненужные единицы сократились, ответ получается около восьми и одной трети метра каждую секунду. Представьте это примерно как длину машины, проходимую каждые полсекунды, — спокойный темп по городу. Книга добавляет, что можно было начать и с половины километра в минуту; понадобились бы другие переводные коэффициенты, но вы пришли бы ровно к тем же восьми и одной трети.

30.0 km/h

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



длина машины за $\frac{1}{2}$ s

8.333333

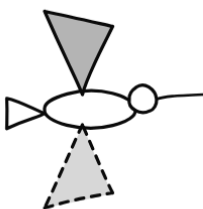
8.33

30 км/ч в метрах в секунду

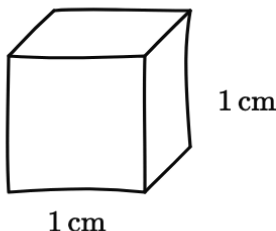
Затем она задаёт острый вопрос. Почему все эти ответы записаны всего тремя цифрами — тридцать целых ноль десятых и восемь целых тридцать три сотых? Калькулятор охотно покажет восемь целых тридцать три тысячи триста тридцать три стотысячных и больше. Почему не записать их все? Книга обещает ответ на следующих страницах, и он связан с тем, насколько хорошими были измерения с самого начала.

Но прежде несколько замечаний на полях. Не всякая единица так опрятна, как метр. Бывают любопытные старые единицы, например фиркин, которым мерили пиво и который вмещает около тридцати четырёх литров, или ячменное зерно — мера

длины. Книга предлагает вам поискать такие единицы и выяснить, как каждая из них связана с СИ.



$\approx 20 \text{ ms}$



$1 \text{ cm}^3 = 1 \text{ mL}$

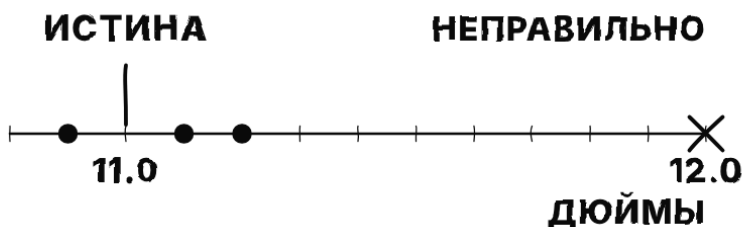


Кубик в один миллилитр

Вот загадка, которую задаёт книга. Некоторые колибри взмахивают крыльями больше пятидесяти раз в секунду. Если учёный хочет засечь время одного взмаха крыла, какую единицу ему взять? Основная единица по-прежнему секунда, но один взмах длится лишь крошечную её долю, около двадцати тысячных. Поэтому естественный выбор — миллисекунда, тысячная доля секунды, и взмах длится около двадцати миллисекунд.

И ещё: один кубический сантиметр, крошечный кубик со стороной в один сантиметр, вмещает ровно один миллилитр. Это показывает, как аккуратно сложена система СИ. Единицу объёма не придумывают отдельно; она построена прямо из единицы длины. Маленький пластмассовый стаканчик к детскому лекарству, размеченный в миллилитрах, на самом деле размечен в крошечных кубиках по одному сантиметру.

Теперь книга обращается к самой сути измерения: насколько хорошо измерение? Она начинает со старинных рычажных весов с двумя чашами. Вы кладёте предмет на одну чашу, а на другую — стандартные металлические гири, один грамм, десять граммов, сто граммов, и когда коромысло между ними стоит ровно, обе стороны весят одинаково. Многие такие весы заменили цифровые, которые точнее: старые весы могут показывать лишь с точностью до десятой грамма, хорошие цифровые — до тысячной. Ваши кухонные весы где-то посередине, обычно показывают с точностью до грамма.



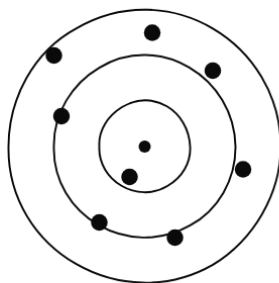
Три измерения 11 дюймов

Вся наука опирается на измерения, и чтобы судить о них, книга пользуется двумя словами, которые звучат похоже, но значат разное. Первое — **правильность**: насколько близко измерение подходит к истинному значению. Скажем, на пачке бумаги для принтера написано, что каждый лист длиной одиннадцать дюймов. Вы измеряете один лист три раза и получаете одиннадцать и одну десятую, одиннадцать и две десятых и десять и девять десятых. Эти измерения **правильные**, потому что все они лежат близко к истинным одиннадцати дюймам; показание двенадцать таким не было бы.

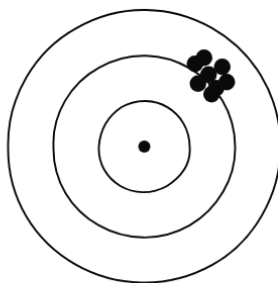
Опыт

Возьмите линейку и измерьте длинную сторону листа бумаги три раза, поднимая линейку между попытками. Скорее всего, вы не получите каждый раз одно и то же число и не получите ровно то, что написано на пачке. Насколько ваши показания близки к заявленному размеру — это их правильность; насколько они близки друг к другу — это следующее понятие.

Второе слово — прецизионность: насколько тесно согласуются друг с другом повторные измерения, сделанные одним и тем же способом. Ваши три показания лежат от десяти и девяти десятых до одиннадцати и двух десятых, разброс всего три десятых дюйма, так что они довольно прецизионны. Если бы вы получили десять и девять десятых, одиннадцать и одну десятую и одиннадцать и девять десятых, разброс был бы гораздо больше, и измерения не были бы прецизионными.



ПРАВИЛЬНО



ПРЕЦИЗИОННО

Правильно или прецизионно

Измерения бумаги оказались и правильными, и прецизионными, но эти два свойства могут расходиться. Книга рисует навигатор, который пытается точно указать ресторан в центре мишени для дартса, и каждая попытка нарисована чёрной точкой. На первой картинке точки широко разбросаны, далеко друг от друга, но сгруппированы вокруг центра: прецизионность низкая, а правильность высокая. На второй точки тесно сбились вместе, но далеко в стороне, вдали от ресторана: прецизионность высокая, а правильность низкая. Второй случай похож на карту в телефоне, которая всегда и очень устойчиво ставит вас на другую сторону улицы. Быть последовательным — не то же самое, что быть правым, а быть правым в среднем — не то же самое, что быть последовательным.

Запомним

Десять километров за двадцать минут — это около восьми и одной трети метра в секунду, каким бы путём вы ни переводили. Один взмах крыла колибри лучше всего засекает в миллисекундах, а кубический сантиметр — ровно миллилитр. Правильность — это насколько измерение близко к истинному значению. Прецизионность — это насколько тесно согласуются друг с другом повторные измерения. Измерение может быть правильным, не будучи прецизионным, или прецизионным, не будучи правильным, — как точки, разбросанные вокруг мишени, или сбившиеся в сторону.

Вопросы

1. Навигатор даёт положения, широко разбросанные, но сгруппированные вокруг истинной точки. Что о нём верно?
 - a. Он прецизионный, но неправильный
 - b. Он правильный, но не прецизионный
 - c. Он и правильный, и прецизионный
 - d. Он ни правильный, ни прецизионный
2. Почему один взмах крыла колибри лучше всего описывать в миллисекундах?
 - a. Потому что один взмах длится всего около двадцати тысячных секунды

- b. Потому что секунда — не основная единица
 - c. Потому что колибри взмахивают крыльями раз в минуту
 - d. Потому что миллисекунды больше секунд
3. О чём говорит то, что один кубический сантиметр равен ровно одному миллилитру?
- a. Что объём — основная величина
 - b. Что сантиметры и миллилитры — величины одного рода
 - c. Что литр придумали раньше метра
 - d. Что СИ строит свою единицу объёма прямо из единицы длины
4. Ваши три измерения бумаги — 11,1, 11,2 и 10,9 дюйма — называют прецизионными. Почему?
- a. Потому что одно из них ровно одиннадцать дюймов
 - b. Потому что их сделали цифровыми весами
 - c. Потому что их разброс всего три десятых дюйма
 - d. Потому что все они больше десяти

Ответы

1. **b)** Точки далеко друг от друга, поэтому прецизионность низкая, но их центр — на ресторане, поэтому правильность высокая.
2. **a)** При пятидесяти взмахах в секунду на каждый приходится около двадцати миллисекунд, так что миллисекунда подходит к размеру измерения.
3. **d)** Миллилитр зависит от сантиметра, так что единица объёма производна от длины.

4. с) Прецизионность — это насколько согласуются повторные показания, а эти различаются не больше чем на три десятых дюйма.

Разобранные примеры

Поездка домой в метрах в секунду Ваша средняя скорость была 30,0 км/ч. Выразите её в метрах в секунду.

Нужно поменять две единицы: часы на секунды и километры на метры.

Час — это 3600 секунд, поэтому разделите на 3600, чтобы часы сократились.

Километр — это 1000 метров, поэтому умножьте на 1000, чтобы сократились километры.

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

Ответ: 8,33 м/с

Задачи

1. Некоторые колибри взмахивают крыльями 50 раз в секунду. Сколько длится один взмах в секундах и в миллисекундах?

Подсказка: Разделите одну секунду на 50 равных частей.

Ответ: Одна пятидесятая секунды, то есть 0,02 с, или 20 миллисекунд.

2. Лист бумаги, который должен быть длиной 11,0 дюйма, измерили три раза и получили 10,9, 11,1 и 11,9 дюйма. Эти измерения правильные, прецизионные, и то и другое или ни то ни другое? Объясните.

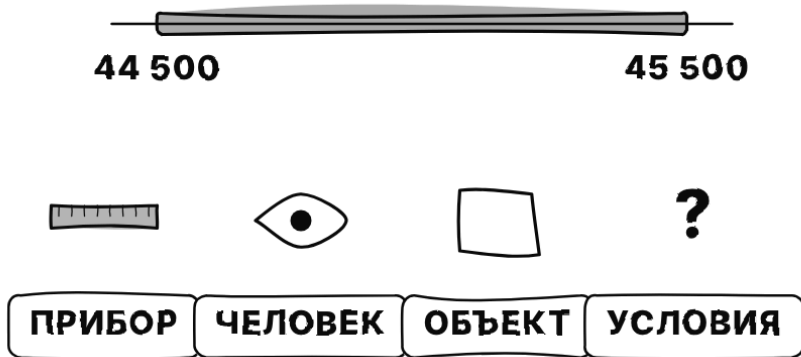
Подсказка: Посмотрите сначала, насколько показания далеки друг от друга, а затем — насколько они близки к 11,0.

Ответ: Они не прецизионные, потому что разброс целый дюйм, от 10,9 до 11,9. Два показания близки к 11,0, но 11,9 сильно отклоняется, так что в целом они и не очень правильные; книга приводит этот набор как пример неprecизионных измерений.

Плюс-минус

Вас спрашивают, сколько проехала ваша машина, вы бросаете взгляд на приборную панель и говорите: около сорока пяти тысяч миль, плюс-минус пятьсот. Это маленькое «плюс-минус» честно и полезно. Оно говорит, что настоящее число может быть и сорок четыре тысячи пятьсот, и сорок пять тысяч пятьсот, и чем угодно между ними. Книга даёт этому «плюс-минус» имя: погрешность, своего рода оговорка, приложенная к каждому измеренному значению.

$45\,000 \pm 500$ миль

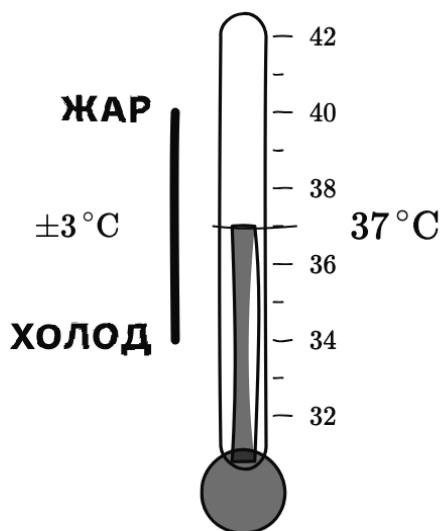


Откуда берётся сомнение

Погрешность — это число, которое говорит, насколько ваше измерение может отклониться от истинного или ожидаемого значения. Она связана с правильностью и прецизионностью, с которыми мы только что познакомились: если измерения не очень правильны или не очень прецизионны, погрешность велика. И она есть у каждого измерения. Лист бумаги для принтера из прошлой части можно честно записать как одиннадцать дюймов плюс-минус две десятых дюйма.

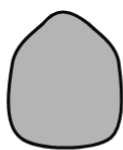
Откуда берётся погрешность? Книга называет четыре источника. У измерительного инструмента есть пределы: если самое мелкое деление линейки — десятая дюйма, гораздо точнее не прочесть. Пределы есть и у того, кто измеряет, — может быть, плохое зрение или нетвёрдая рука. Измеряемый предмет может быть неровным, как лист бумаги, у которого одна сторона чуть длиннее другой. И могут быть другие влияния, в зависимости от обстоятельств. Обоснованная погрешность получается, если тщательно продумать их все.

Почему это так важно? Ответ книги — больной ребёнок. Вы подозреваете жар и берёте градусник, но представьте, что он может ошибаться на три градуса Цельсия в любую сторону. Он показывает тридцать семь, нормальную температуру, а на самом деле может быть что угодно — от опасно низких тридцати четырёх до опасного жара в сорок. Такой градусник был бы бесполезен. Поэтому медицинский градусник должен быть гораздо надёжнее: несколько градусов сомнения скрыли бы именно ту разницу, которую вам нужно увидеть.



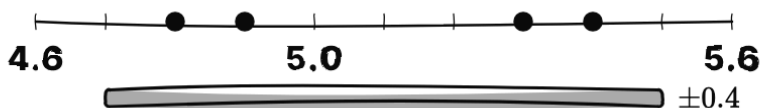
Градусник, ошибающийся на три градуса

Есть удобный способ оценить, насколько велика погрешность на самом деле: сравнить её с самим измерением в процентах. Это называется относительной погрешностью в процентах: сколько сотых долей измеренного значения составляет «плюс-минус». Книга показывает это на пакете яблок. Магазин продаёт пакеты с надписью «пять фунтов», и за месяц вы покупаете четыре и взвешиваете их: четыре и восемь десятых, пять и три десятых, четыре и девять десятых и пять и четыре десятых фунта. Их среднее — пять и одна десятая фунта, а по прежним взвешиваниям вы знаете, что вес пакета известен с погрешностью около четырёх десятых фунта.



5 lb

СРЕДНЕЕ 5,1



$$\frac{0.4}{5.1} \approx 8\%$$

Пять фунтов, плюс-минус

Опыт

Взвесьте одну и ту же пачку макарон или риса на кухонных весах несколько раз, каждый раз снимая её и ставя обратно.

Сравните показания с весом, напечатанным на пачке.

Разброс ваших показаний и то, насколько они далеки от этикетки, дадут вам почувствовать «плюс-минус» ваших собственных весов.

Четыре десятых фунта из примерно пяти — это примерно восемь процентов. Значит, пакет весит пять фунтов плюс-минус восемь процентов, и измеренное вами среднее спокойно укладывается в

этот диапазон вокруг надписи. Магазин вас не обманывает; колебания от недели к неделе укладываются в честное «плюс-минус». Книга добавляет вопрос для размышления: если бы пакет был вдвое легче, но с тем же «плюс-минус», погрешность составляла бы гораздо большую его долю, вдвое большую в процентах. И практическое предупреждение: относительная погрешность в процентах — это дробь, переведённая в сотые доли, поэтому не забудьте перевести её в проценты, а не оставлять маленькой десятичной дробью.

Запомним

Погрешность — это «плюс-минус» измерения, насколько оно может отличаться от истинного значения, и она есть у каждого измерения. Она возникает из пределов инструмента, умения человека, неровности предмета и обстоятельств. Измерение со слишком большой погрешностью, как градусник, который может ошибаться на три градуса, бесполезно. Относительная погрешность в процентах сравнивает «плюс-минус» с самим измеренным значением. Пакет яблок в пять фунтов, известный с точностью около четырёх десятых фунта, — это пять фунтов плюс-минус восемь процентов.

Вопросы

1. Вы говорите, что ваша машина проехала 45 000 миль, плюс-минус 500. Что вы утверждаете?

- a. Что настоящий пробег ровно 45 000
 - b. Что настоящий пробег лежит где-то между 44 500 и 45 500
 - c. Что настоящий пробег не меньше 45 500
 - d. Что одометр сломан
2. Почему градусник, который может ошибаться на три градуса, бесполезен для больного ребёнка?
- a. Потому что он всегда показывал бы жар
 - b. Потому что три градуса — слишком мало, чтобы иметь значение
 - c. Потому что нормальное показание могло бы скрывать что угодно — от опасного холода до опасного жара
 - d. Потому что градусники не могут измерять детей
3. Если бы пакет был вдвое легче, но с тем же «плюс-минус», что стало бы с его относительной погрешностью в процентах?
- a. Она стала бы вдвое больше
 - b. Она стала бы вдвое меньше
 - c. Она бы не изменилась
 - d. Она бы исчезла
4. Что из этого — один из источников погрешности, названных в книге?
- a. Цвет предмета
 - b. Время суток, когда записывают измерение
 - c. Марка линейки
 - d. Неровность измеряемого предмета

Ответы

1. **b)** «Плюс-минус» — это погрешность, так что истинное значение может быть где угодно в пределах 500 миль в любую сторону.
2. **c)** Показание 37 на самом деле может значить что угодно от 34 до 40 градусов, так что оно не скажет того, что вам нужно знать.
3. **a)** Тот же «плюс-минус» составляет большую долю меньшего значения — вдвое большую в процентах.
4. **d)** Книга перечисляет пределы инструмента, умение человека, неровность предмета и другие влияния обстоятельств.

Задачи

1. Пакет с надписью «5 фунтов» за четыре недели весит 4,8, 5,3, 4,9 и 5,4 фунта, а его вес известен с погрешностью около четырёх десятых фунта. Честна ли надпись на пакете и примерно какую долю веса составляет погрешность?

Подсказка: Найдите среднее, затем сравните четыре десятых фунта примерно с пятью фунтами.

Ответ: Среднее — 5,1 фунта, в пределах четырёх десятых фунта от надписи, так что надпись честная. Четыре десятых из примерно пяти — это примерно восемь процентов.

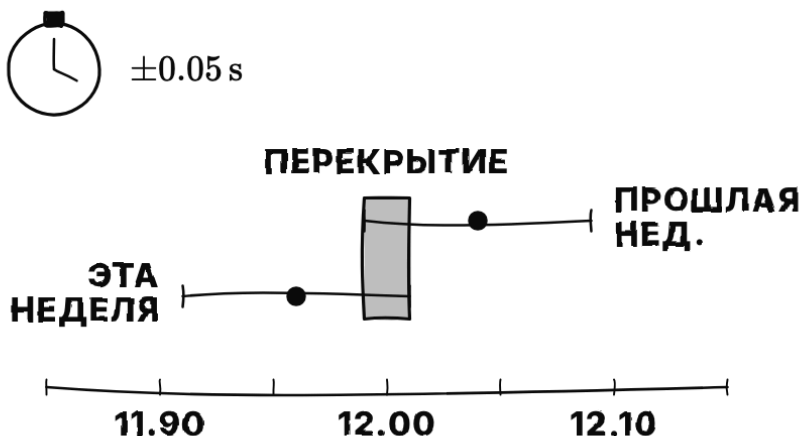
2. Вы измеряете лист бумаги линейкой, самое мелкое деление которой — десятая дюйма. Назовите две вещи, кроме линейки, которые могут увеличить погрешность результата.

Подсказка: Подумайте о том, кто измеряет, и о самом листе.

Ответ: Например, плохое зрение или нетвёрдая рука того, кто измеряет, и лист, обрезанный чуть криво, так что одна сторона длиннее другой.

Сколько цифр вы заслужили

Школьная команда бегунов получает новый секундомер, и в инструкции сказано, что он может ошибаться на пять сотых секунды в любую сторону. На прошлой неделе лучший спринтер пробежал сто метров за двенадцать целых четыре сотых секунды; на этой неделе секундомер показывает одиннадцать целых девяносто шесть сотых. Стал ли спринтер быстрее? Похоже на то, но ответ книги — нет: разница так мала, что её может объяснить собственный «плюс-минус» секундомера. С таким секундомером эти два забега просто не различить.



Два забега, которые секундомер не различит

Это первый урок этой части: всё, что вы вычисляете из измерений, несёт с собой их сомнение. Допустим, вы измеряете пол комнаты, чтобы найти его площадь. Длина немного неточна, ширина тоже, поэтому и вычисленная из них площадь должна быть неточной. Для умножения или деления измерений с небольшими погрешностями, в несколько процентов или меньше, книга даёт удобное правило: просто сложите их относительные погрешности в процентах.



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

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

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

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

$$\approx \pm 0.4 \text{ m}^2$$

Относительные погрешности складываются

Её пример — пол длиной четыре метра и шириной три метра. Длина известна с погрешностью два процента, а ширина — один процент. Площадь выходит двенадцать квадратных метров, а её погрешность — два и один вместе, три процента. Три процента от

двенадцати квадратных метров — чуть больше трети квадратного метра, и книга округляет это примерно до четырёх десятых квадратного метра. Если вы покупаете напольное покрытие для этой комнаты, вот почему разумно заказать немного с запасом: ваши собственные измерения переносят свой «плюс-минус» в площадь.

Второй урок — об инструменте. Прецизионный измерительный инструмент — тот, который может показывать очень мелкие шаги. Обычная линейка измеряет с точностью до миллиметра, а штангенциркуль, раздвижной инструмент с тонкими губками, — до сотой доли миллиметра. Штангенциркуль — более прецизионный инструмент, а чем прецизионнее инструмент, тем прецизионнее и правильнее могут быть ваши измерения.

Опыт

Положите линейку рядом с карандашом и прочитайте его длину как можно тщательнее. Вы обнаружите, что конец попадает между двумя миллиметровыми делениями, так что последнюю цифру приходится оценить на глаз. Эта последняя, оценённая цифра — именно то, что книга называет первой цифрой, в которой есть некоторое сомнение.

Отсюда идея значащих цифр: вы записываете только столько цифр, сколько ваш инструмент действительно измерил. Если линейка говорит, что палочка длиной тридцать шесть и семь десятых сантиметра, нельзя записать тридцать шесть целых семьдесят одну сотую, потому что линейка не видит сотой доли

сантиметра. И даже последняя записанная цифра, семёрка, была отчасти догадкой: конец палочки, казалось, приходился где-то между тридцатью шестью и шестьюдесятыми и тридцатью шестью и семьюдесятыми, и вам пришлось оценить. Чтобы сосчитать значащие цифры, начните с первой измеренной цифры слева и считайте до последней записанной справа; в тридцати шести и семи десятых их три. Число значащих цифр говорит, насколько прецизионным был инструмент. Кухонные весы, показывающие целые граммы, не могут честно дать вес специи до десятой грамма, как бы тщательно вы ни смотрели.

С нулями нужна особая осторожность, потому что одни измерены, а другие лишь держат место. В нуле целых пятидесяти трёх тысячных нули впереди лишь показывают, где стоит запятая, поэтому они не считаются; в числе две значащие цифры. В десяти целых пятидесяти трёх тысячных нули стоят между другими цифрами и действительно были измерены, поэтому считаются все пять цифр. Круглое число вроде тысячи трёхсот неоднозначно: его нули могли быть измерены, а могли просто заполнять место, так что в нём может быть две, три или четыре значащие цифры. Чтобы избежать этой путаницы, книга советует записывать такие числа через степени десяти. Практическое правило: нули считаются, кроме тех случаев, когда они лишь держат место.

$0.053 \rightarrow 2$	$0.0009 \rightarrow 1$
$10.053 \rightarrow 5$	$15\,450.0 \rightarrow 6$
$1300? \rightarrow 2-4$	$87.990 \rightarrow 5$
$1.3 \times 10^3 \rightarrow 2$	$30.42 \rightarrow 4$

Какие нули считаются

Книга заканчивает быстрой проверкой. В нуле целых девяти десятитысячных одна значащая цифра, потому что все нули держат место. В пятнадцати тысячах четырёхстах пятидесяти целых и нуле десятых их шесть, потому что нули, включая тот, что после запятой, показывают измерение с точностью до десятой. В восьмидесяти семи целых девятистах девяноста тысячных их пять: последний ноль фиксирует измерение с точностью до тысячной. А в тридцати целых сорока двух сотых их четыре, потому что ноль, стоящий между другими цифрами, всегда считается.

Запомним

Всё, что вычислено из измерений, тоже неточно; при умножении или делении складывайте небольшие относительные погрешности в процентах. Если «плюс-минус» инструмента так же велик, как разница, которую вы хотите увидеть, как с секундомером спринтера, результаты не различить. Более прецизионный инструмент, как штангенциркуль по сравнению с линейкой, измеряет более мелкими шагами. Записывайте только столько цифр, сколько инструмент действительно измерил; последняя уже отчасти оценена. Нули считаются, когда они измерены, а не когда лишь держат запятую на месте.

Вопросы

1. Почему тренер не может быть уверен, что спринтер стал быстрее, пробежав за 11,96 с вместо 12,04 с?
 - a. Потому что «плюс-минус» секундомера достаточно велик, чтобы объяснить небольшую разницу
 - b. Потому что время спринта никогда не сравнивают от недели к неделе
 - c. Потому что 100 метров — слишком короткая дистанция, чтобы её засечь
 - d. Потому что второй забег был медленнее

2. Длина пола известна с погрешностью 2 %, а ширина — 1 %.
Какова погрешность его площади?
- a. 1 %
 - b. 2 %
 - c. 3 %
 - d. 6 %
3. Почему нельзя записать длину палочки как 36,71 см, если вы измеряли её обычной линейкой?
- a. Потому что 36,71 — слишком длинно для палочки
 - b. Потому что линейка не может измерять до сотой доли сантиметра
 - c. Потому что длины всегда должны кончаться нулём
 - d. Потому что линейки измеряют только в дюймах
4. Сколько значащих цифр в числе 30,42?
- a. Две
 - b. Три
 - c. Пять
 - d. Четыре

Ответы

1. **a)** Когда погрешность инструмента так же велика, как разница, которую вы хотите увидеть, результаты не различить.
2. **c)** При умножении измерений с небольшими погрешностями относительные погрешности складываются: $2 \% + 1 \% = 3 \%$.
3. **b)** Записывают только столько цифр, сколько инструмент действительно измерил, а линейка показывает миллиметры, а не

сотые доли сантиметра.

4. d) Ноль между другими цифрами был измерен и всегда считается, так что значащие все четыре цифры.

Задачи

1. Определите, сколько значащих цифр в каждом числе, и объясните почему: 0,053; 10,053; 0,0009; 87,990.

Подсказка: Нули впереди лишь ставят запятую; нули между цифрами или в конце после запятой были измерены.

Ответ: В 0,053 — две, потому что нули впереди держат место. В 10,053 — пять, потому что его нули стоят между другими цифрами. В 0,0009 — одна. В 87,990 — пять: последний ноль показывает измерение с точностью до тысячной.

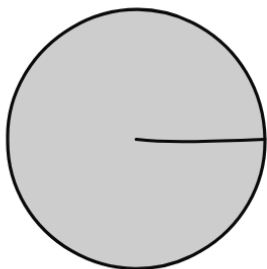
2. Пол длиной 4,00 м и шириной 3,00 м, с погрешностями 2 % и 1 %. Какова площадь и примерно на сколько квадратных метров она может отличаться?

Подсказка: Перемножьте, чтобы найти площадь, и сложите проценты, чтобы найти её погрешность.

Ответ: Площадь — 12,0 квадратного метра с погрешностью 3 %, что составляет около трети квадратного метра; книга округляет это до 0,4 квадратного метра.

Честные цифры и смелые прикидки

Измерьте рулеткой круглую столешницу — и вы найдёте, что её радиус, от центра до края, около одного и двух десятых метра. Попросите калькулятор найти площадь, и он гордо покажет восемь цифр: четыре целых пятьдесят две тысячи триста восемьдесят девять стотысячных и так далее. Каждая цифра выглядит надёжной. Но ваша рулетка с самого начала дала вам всего две цифры, так откуда в ответе восемь? Их там быть не может, и эта последняя часть — о том, сколько цифр ответ действительно заслужил, а затем о противоположном искусстве: делать хорошую прикидку почти 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

Цифры, которые позволяет радиус

Основное правило книги простое. Когда вы сочетаете измерения разного качества, ответ не может быть прецизионнее самого грубого из них. Цепь прочна лишь настолько, насколько прочно её слабое звено, а расчёт хорош лишь настолько, насколько хорошо его самое грубое измерение. У правила две формы: одна для умножения и деления, другая для сложения и вычитания.

При умножении и делении в ответе остаётся столько значащих цифр, сколько их у измерения, где их меньше всего. У радиуса стола их было две, так что площадь честно равна четырём и пяти десятым квадратного метра — две цифры, не больше. Неважно, что число пи, которым вы тоже пользуетесь, чтобы найти площадь, известно с гораздо большим числом цифр; слабое звено

звено — радиус. То же и с дозой лекарства, рассчитанной по весу, прочитанному на напольных весах: доза не может быть точнее этого показания весов.

При сложении и вычитании правило касается не значащих цифр, а знаков после запятой. Книга следит за партией картофеля. Вы покупаете семь целых пятьдесят шесть сотых килограмма в магазине, на весах, которые показывают сотые доли килограмма. Вы сдаёте шесть целых пятьдесят две тысячных килограмма в лабораторию, на более точных весах, которые показывают тысячные. Затем вы добавляете дома тринадцать и семь десятых килограмма, взвешенных на напольных весах, которые показывают только десятые. Сложите и вычтите — и получите пятнадцать целых двести восемь тысячных килограмма, но напольные весы знали только десятые, так что честный ответ — пятнадцать и две десятых.

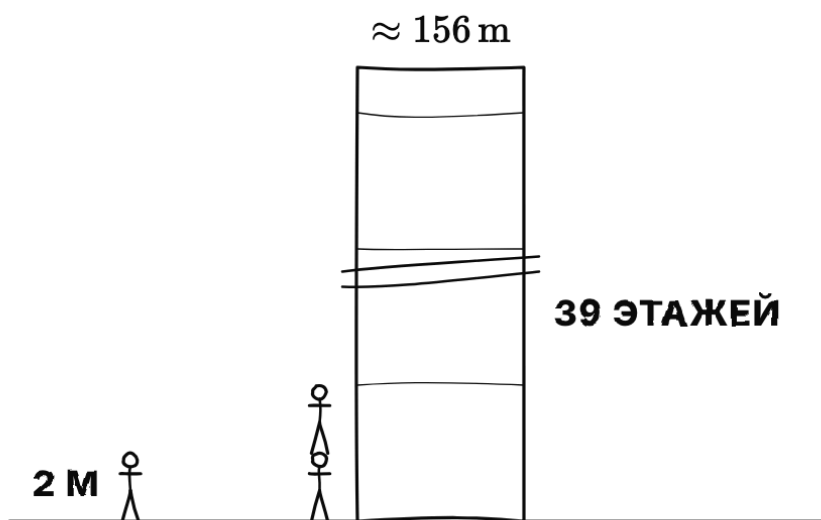
$$\begin{array}{r}
 7.56 \text{ kg} \\
 - 6.052 \text{ kg} \\
 + 13.7 \text{ kg} \quad \text{ЛИШЬ ДЕСЯТЫЕ} \\
 \hline
 15.208 \text{ kg} \longrightarrow 15.2 \text{ kg}
 \end{array}$$

Сложение: меньше всего знаков после запятой

Некоторые числа вообще никогда не ограничивают число цифр, потому что они точные. Если женщина несёт две сумки по тринадцать с половиной фунтов и одну в десять и две десятых, то «две» — это счёт, а не измерение, поэтому в нём нет сомнения; всего тридцать семь и две десятых фунта. Точно так же двойка в правиле для длины окружности точная. Книга объясняет и свою собственную привычку: у большинства чисел в ней три значащие цифры, больше — только там, где предмет, например оптика, требует особой тщательности. И она предлагает быструю проверку: тележка массой пятьдесят пять килограммов, плавно разгоняясь, испытывает толчок, который находят, умножая её массу на то, как быстро растёт её скорость; поскольку в пятидесяти пяти только две цифры, ответ — одна целая четыре

десятих в единицах силы, называемых ньютонами, — тоже имеет только две.

Теперь книга переворачивает весь вопрос. Очень часто учёным и инженерам вовсе не нужно много цифр. Им нужна быстрая разумная оценка, которую книга весело называет прикидкой. Как далеко тот город? Примерно какова плотность этого предмета? Около какого тока течёт в этой цепи? Такие оценки отсекают невозможные ответы, позволяют оспорить чужие утверждения и подсказывают следующий шаг. Это умение растёт с практикой, с чутьём к единицам и с готовностью рискнуть и назвать число.



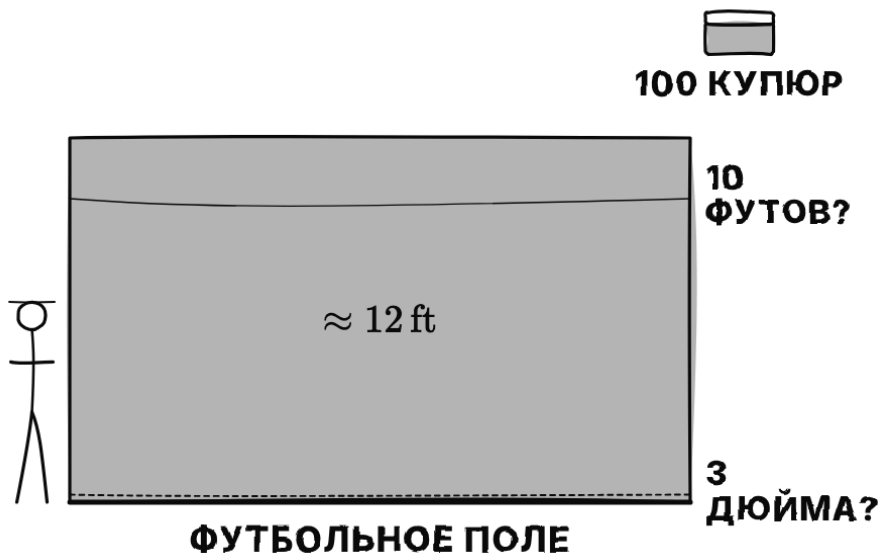
Здание в людях

Первый пример — высокое здание в тридцать девять этажей. Какой оно высоты, если нет рулетки? Отталкивайтесь от человека. Книга принимает рост взрослого мужчины примерно за два метра, а один этаж — примерно за двух человек, стоящих друг у друга на голове. Значит, каждый этаж около четырёх метров, и тридцать девять этажей дают примерно сто пятьдесят шесть метров.

Опыт

Измерьте ширину своей ладони; у многих она около десяти сантиметров. Теперь пройдитесь ладонью поперёк стола, считая ладони. Десять ладоней — это около метра, и вы измерили стол без всякой линейки, как и советует книга.

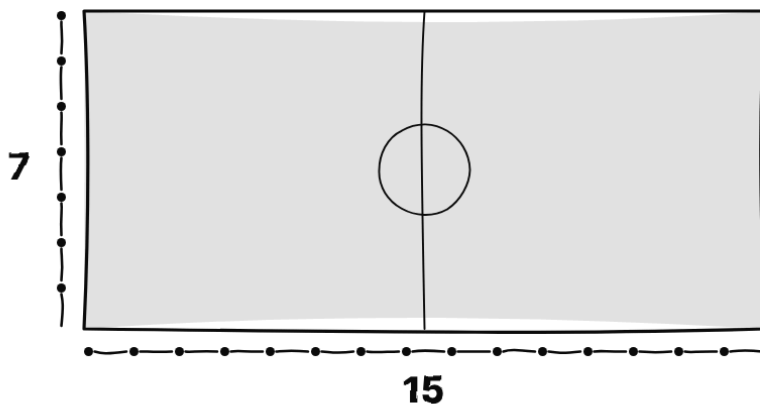
Второй пример берётся за число, которое почти никто не может себе представить: триллион долларов. Книга отмечает, что в 2021 году долг США составлял чуть больше двадцати восьми триллионов долларов, но мало кто может представить даже один триллион. Так что представьте его стодолларовыми купюрами, собранными в банковские пачки по сто купюр, как в кино, и каждая пачка стоит десять тысяч долларов. Теперь разложите все эти пачки ровным слоем по полю для американского футбола, от одной зачётной зоны до другой. Какой высоты будет куча? Один друг гадает — три дюйма; другой — десять футов.



Триллион долларов на поле

Книга проходит расчёт с нарочно грубыми числами, оставляя всего одну значащую цифру. Одна купюра примерно три дюйма на шесть, а пачка из ста купюр толщиной около полудюйма, так что каждая пачка — маленький бумажный кирпичик. Триллион долларов в пачках по десять тысяч — это около ста миллионов пачек. Поле, сто ярдов на пятьдесят, даёт примерно шесть миллионов квадратных дюймов. Разложите кирпичики по этой площади, и куча получается высотой около ста пятидесяти дюймов, примерно двенадцать футов. Так что догадка в три дюйма была слишком мала, а догадка в десять футов — совсем неплоха. Урок не в точной высоте, а в методе: тщательная грубая оценка, построенная из того, что можно себе представить, лучше интуиции.

Последнее задание книги — оценить площадь баскетбольной площадки одним лишь устным счётом. Представьте людей ростом около двух метров, лежащих друг за другом: около пятнадцати вдоль площадки и около семи поперёк. Это даёт примерно тридцать метров на четырнадцать и площадь около четырёхсот двадцати квадратных метров. То же можно проделать со своей гостиной, считая, сколько длин вашего тела укладывается вдоль каждой стены.



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

Площадка в длинах тела

На этом заканчивается первая глава, а вместе с ней и этот курс. Физика, как мы слышали, ищет несколько простых законов под бесконечно разнообразным миром, измеряет этот мир в условленных единицах, честно говорит, насколько она уверена, и

знает, когда считать каждую цифру, а когда хватит смелой разумной прикидки.

Запомним

Ответ никогда не может быть прецизионнее самого грубого измерения, на котором он основан. При умножении или делении оставляйте столько значащих цифр, сколько у измерения, где их меньше всего; при сложении или вычитании — столько знаков после запятой, сколько у самого грубого измерения. Точные числа, например количество сумок, никогда не ограничивают число цифр. Хорошая прикидка отталкивается от знакомых вещей, вроде роста человека или ширины ладони, и быстро отсекает невозможные ответы. Триллион долларов стодолларовыми купюрами покрыл бы футбольное поле слоем примерно в двенадцать футов.

Вопросы

1. Почему площадь стола с радиусом 1,2 м дают как 4,5 квадратного метра, а не 4,5238934?
 - a. Потому что число пи известно только до двух цифр
 - b. Потому что радиус измерили всего с двумя значащими цифрами
 - c. Потому что площади всегда округляют до десятых

- d. Потому что калькуляторам нельзя доверять после двух цифр
2. Почему общий вес картофеля дают как 15,2 кг, а не 15,208 кг?
- a. Потому что напольные весы, самые грубые, показывали только десятые
 - b. Потому что лабораторные весы были сломаны
 - c. Потому что картофель со временем теряет вес
 - d. Потому что сложение всегда убирает цифры
3. Почему «две» в «двух сумках по 13,5 фунта» не ограничивает число цифр ответа?
- a. Потому что два — маленькое число
 - b. Потому что сумки не взвешивают
 - c. Потому что в двойке всего одна цифра
 - d. Потому что это счёт, точное число без всякого сомнения
4. Каков главный урок примера с триллионом долларов?
- a. Что куча денег была бы ровно двенадцать футов
 - b. Что интуиция обычно права
 - c. Что грубая оценка, построенная из того, что можно себе представить, лучше интуиции
 - d. Что полезны только точные расчёты

Ответы

1. b) При умножении в ответе остаётся столько значащих цифр, сколько у измерения, где их меньше всего, — здесь у радиуса.

- 2. а)** При сложении и вычитании в ответе не больше знаков после запятой, чем у наименее прецизионного измерения.
- 3. d)** Сосчитанные или заданные определением числа не несут погрешности, поэтому никогда не ограничивают значащие цифры.
- 4. с)** Суть в методе: тщательный грубый расчёт из знакомых кусочков отсекает дикие догадки вроде трёх дюймов.

Разобранные примеры

Какой высоты 39-этажное здание? Оцените высоту 39-этажного здания, считая рост человека около 2 м, а один этаж — высотой примерно в двух человек.

Один этаж — это примерно два человека по 2 м каждый, значит, этаж около 4 м.

Этажей 39.

39 этажей примерно по 4 м дают около 156 м.

Ответ: Около 156 м.

Задачи

1. У женщины три сумки: две весят по 13,5 фунта, а одна — 10,2 фунта. Каков их общий вес?

Подсказка: Число сумок точное; сложите веса и посмотрите на их знаки после запятой.

Ответ: 37,2 фунта: $13,5 + 13,5 + 10,2 = 37,2$, а счёт «две сумки» не ограничивает число цифр.

2. Устным счётом оцените площадь баскетбольной площадки, представив людей ростом около двух метров, лежащих друг за другом.

Подсказка: Прикиньте, сколько людей уместится вдоль и поперёк.

Ответ: Около пятнадцати человек вдоль и семи поперёк дают примерно 30 м на 14 м, площадь около 420 квадратных метров.