Числа и физические величины

Может быть, вам трудно дается физика. Скажу по секрету: для многих эти трудности преодолимы. В большинстве случаев это связано с тем, что вам изначально не удалось понять чего-то простого. В этой статье мы постарались почти на бытовом языке рассказать, что такое физическая величина, и как с ней следует работать на физике. Может быть, именно эта статья вам и поможет.

Большие и маленькие

Физическая величина - это физическое свойство чего-либо, которое может быть определено количественно с помощью измерения.
Физическая величина может быть выражена как некоторое значение, представляющее собой алгебраическое умножение численного значения и единицы измерения. Численные значения физических величин мы для краткости здесь позволим себе называть просто числами.

Некоторые физические величины выражаются по природе своей очень маленькими числами. Таковы, например, размеры и массы атомов и молекул. Диаметр самого маленького атома – атома водорода 0,00000000003 метра, а масса его 0,00000000000000000000000000003346 кг.
Еще меньшее численное значение имеют массы, заряды и размеры элементарных частиц.
Казалось бы, такими крошечными величинами можно пренебречь, округлив их до нуля. Но такое не всегда будет правильно. Например, если мы хотим узнать массу 10^{25} штук атомов водорода (10 000 000 000 000 000 000 000 000), то нам надо будет умножить это количество на массу одного атома и, если мы округлим ее до нуля, мы в ответе получим умножение на ноль, то есть 0 кг! А это не так: $10^{25}*3{,}346*10^{-27}$кг = $3{,}346*10^{-2}$кг = 33,46 г водорода, а это вовсе не ноль. Даже малые величины имеют значение, особенно когда их много, ими нельзя пренебрегать. Здесь мы также видим, что иногда в физике встречаются и очень большие числа, например, когда речь идет о количестве частиц, или об астрономических объектах во Вселенной.

А вот пример на деление. Если взять и плотно друг к другу приложить все молекулы из одной квадриллионной доли (10^{-15}) грамма водорода, то какой длины получится цепочка? Для этого надо число молекул водорода в 1 квадриллионной доле грамма умножить на диаметр одной молекулы, а число молекул мы найдем делением массы водорода на массу одного атома: 10^{-15} г/$3{,}346*10^{-24}$ г = 298864315,6 штук. Ой, ой! А 0,6 атома не бывает! Также как не бывает 0,6 стула. 0,6 стула это уже не стул, а дрова. Для нас это значит, что никогда нельзя взять ровно 10^{-15} г водорода, а можно только или чуть больше, или чуть меньше. Также нельзя математически точно взять ровно 1 кг любого вещества. Всегда будет или чуть больше или чуть меньше. Плюс – минус одна молекула. Округлим: 298864316 молекул умножить на 0,00000000003 метра = 0,0896592946 м = 90 мм. Не так уж и мало! А если бы мы массу атома водорода округлили до нуля, то нам пришлось бы делить на ноль, а это уж совсем никуда не годится. Округляй, да думай! И слишком увлекаться делением в физике не получается, всегда найдется предельно малая величина, поделить которую не удастся без потери смысла. Нет, молекулу водорода можно поделить на части. Получим два атома водорода, а, поделив их, получим элементарные частицы, а, их поделив, получим гипотетические кварки и т.д. Но это уже будут качественно совсем другое, чем молекула водорода. Так что 0,6 молекулы не получится никак. Отметим себе, в физике все приблизительно, нельзя измерить с любой степенью точности ни массу, ни размер, ни многое другое.

Ноль и бесконечность.

В математике используются такие два необычных числа, как ноль и бесконечность (0 и ∞).
Ноль можно представить как пустое множество. Надо сказать, что в физике пустого пространства не бывает. «Нечто» (у нас пространство) должно иметь длину, ширину, высоту, а «ничто» (здесь абсолютно пустое пространство) не может иметь длину. Длина такого объекта, как «ничто» равна нулю.
Ноль прибавить ноль, будет ноль.
Ноль умножить на любое число, будет ноль.
На ноль делить нельзя. Это чисто логически, нельзя делить яблоко «не на сколько». Это бессмыслица.
В физике ноль означает отсутствие чего-либо. Например, в ядре атома водорода один протон и ноль нейтронов.

Бесконечность это не есть очень большое число, это бесконечность. Бесконечность представить себе, по-видимому, нельзя. Но есть у бесконечности отличительные свойства, которыми можно пользоваться независимо от того, можете вы себе представить бесконечность или нет.
Бесконечность умножить на три, будет не три бесконечности. Будет та же самая бесконечность.
Бесконечность поделить на миллион, будет не в миллион раз меньшая бесконечность. Будет та же самая бесконечность.
Бесконечность минус бесконечность будет ноль.
Любое, даже самое большое число, деленное на бесконечность, дает ноль.
Некоторые физики и астрономы полагают, что бесконечна, например, наша вселенная. Не факт.
Бесконечным может быть замкнутое пространство. Например, лента Мебиуса. Возьмите полоску бумаги, переверните ее по длинной оси на пол-оборота и склейте ее концы. Двигаясь по такой ленте, вы никогда не встретите ее конца или начала. Физически это не совсем так. В конце концов, лента со временем может истлеть, и совсем уж бесконечного движения не получится.

На приведенных выше примерах мы видим, что математика и физика иногда дают несколько разный результат. Нельзя бездумно округлять, нельзя бесконечно делить вещество, а, может быть, и пространство. Нельзя совершенно точно отмерить данное количество чего-либо. Нельзя бесконечно двигаться в одном направлении и т.д. Это связано с тем, что в математике используются идеальные объекты, а в физике приходится иметь дело с реальными. Идеальные объекты содержат в себе меньше деталей, что позволяет для них упростить описание их поведения (в первую очередь математическое). Физика часто прибегает к так называемому упрощению, когда поведение реального объекта заменяют его упрощенной моделью поведения, чтобы преодолеть трудности описания. При этом надо всегда помнить, что экстраполировать поведение модели на реальный объект надо, ой, как осторожно! Всегда надо помнить, какое упрощение мы допустили, где граница его применимости. Применение математических процедур в физике требует известной степени аккуратности, иначе мы начнем получать нелепые результаты.

Бесконечно малые и бесконечно большие.

В математике используют так называемые бесконечно малые и бесконечно большие величины. Ими занимается теория пределов и, связанные с ним дифференциальное и интегральное исчисления, чрезвычайно полезный, в том числе для физики, раздел математики. Он позволяет

любую, даже самую сложную функцию свести к простой линейной, заменяя сложную зависимость сколь угодно большим количеством сколь угодно малых по длине отрезков линейной функции (дифференциалов), достигая сколь угодно точного приближения к реальной зависимости (операция дифференцирования).

Сложное превращается в простое! Мы получаем в физике возможность выводить формулы движения и для переменной скорости, и для переменного ускорения, и для криволинейного движения, и описывать все разнообразие физических явлений, какими бы сложными они ни были.

Только мы помним, что слишком долго делить в физике не получится, и слишком долго умножать тоже. Физика ставит свои пределы для всего. Так все, увеличивая скорость тела, мы сталкиваемся, неожиданно для себя, с тем, что с увеличением скорости возрастает и инертная масса, и разгонять тело становится все труднее и труднее. А всё, уменьшая температуру проводника, мы рано или поздно обнаружим, что его электрическое сопротивление вдруг скачком превращается в ноль. Большими скоростями и малыми величинами занимаются такие, например, разделы физики современной физики, как теория относительности и квантовая механика. Только неверно думать, что эти разделы физики занимаются чем-то необыкновенным, почти мистическим, волшебным. Явления, которые изучает современная физика (квантование орбит электронов в атомах, сверхпроводимость, сверхтекучесть, теория излучения абсолютно черного тела, дифракция электронов и пр.), не являются чем-то появляющимся ниоткуда чудом. Все эти явления прекрасно существуют в мире привычных для нас небольших скоростей и внятных объемов, только не проявляются заметно на фоне или из-за слишком слабого эффекта, либо из-за слишком большого количества частиц.

А скачки в поведении тел - дело даже очень обыкновенное. Так, слишком усердствуя с охлаждением воды, мы рискуем получить из нее твердое вещество – лед. Скачком. Ибо в природе нет промежуточного состояния между твердым и жидким. А, усердствуя с нагреванием той же воды, мы рискуем получить газообразное состояние ее – пар, и тоже скачком. Физика не позволяет нам думать, что мир устроен линейно, что можно двигаться и двигаться без конца в одном направлении. Рано или поздно что-нибудь, да, произойдет. Количество когда-нибудь скачком породит новое качество, данное превратится в иное. Это важно усвоить для понимания физики. В математике это иногда проще.

Математика и физика хаоса.

Мы живем в мире, наполненном огромным количеством частиц. Эти частицы постоянно движутся, сталкиваются, меняют от этого свою скорость, энергию. Уследить за всеми этими событиями кажется совершенно не возможно. Хаос – название нашему миру. Это мир случайных величин, ибо столкновение одной пары молекул друг с другом никак не связано со столкновением другой пары молекул между собой.

Как же наш мир существует? Как в нем вообще при таком хаосе могут выполняться какие-либо законы природы? Разве может быть в хаосе закон?

Обычно в математике на этот случай используют такой простой и понятный пример. Будем бросать монетку, и смотреть, как она упадет. Орел или решка?

Однозначно предсказать, что будет в данном случае нельзя, слишком много случайных причин влияет на конечный результат. Однако если мы проведем достаточно много опытов, то увидим, что орел и решка выпадают примерно одинаковое количество раз. Говорят, что вероятность выпадения орла или решки будет равна 50%. Понятно?

Если понятно, то тогда следующий вопрос: если 5 раз подряд выпала решка, то в следующем испытании, скорее всего, выпадет... Нет. Предсказать, что выпадет невозможно. Ибо предыдущий опыт никак не связан с последующим. Может выпасть, что угодно, и знание вероятности 50% нам в данном случае никак не поможет. Вот теперь поняли? Вероятность работает для большого количества испытаний, а для одного – нет. Совсем нет.

И еще для физики важно, если мы встречаем случайную величину, то, скорее всего, причиной такого поведения ее является то, что в данном случае действует большое количество независимых причин. Например, мы знаем, что распад ядра радиоактивного вещества носит случайный характер. Это значит, что на распад влияет большое количество разнонаправленных событий внутри ядра атома. Если предсказать направление пролета отдельного электрона сквозь малую щель не возможно, то это значит, что на его поведение при пролете через щель влияет множество разнообразных причин. И только. Ничего загадочного и таинственного в этой дифракции электронов нет.

Итак, для большого количества случайных событий закон есть. Есть и другие закономерности в мире случайного, вы с ними познакомитесь в процессе изучения физики, но нет закона, что после пяти подряд выпавших решек выпадет, скорее всего, орел. В случайном последующее все так же не зависит от предыдущего.

Иногда очень полезно бывает вычисление среднего значения случайной величины. В простых случаях его находят как среднее арифметическое, но это правильно работает не всегда. Тогда приходится среднее находить более сложным путем.

Например, мы хотим найти среднюю скорость молекул кислорода в нашей комнате (то есть при комнатной температуре). Если мы возьмем и сложим скорости всех молекул и поделим это число на число молекул в комнате, то получим ноль. Оно и понятно. В среднем воздух в комнате никуда не движется, никакой средней скорости у него в целом нет. На каждую молекулу, движущуюся в данном направлении с данной скоростью, всегда найдется такая же, движущаяся в обратном направлении, ввиду огромного числа молекул. Плюс на минус даст ноль. Или иначе, сколько времени одна молекула движется в заданном направлении, в среднем столько же времени она движется в обратном, а в целом воздух остается на месте. Среднее нивелирует частности (это важно!)

Но ведь отдельные молекулы движутся, а не стоят на месте. С какой же в среднем скоростью они движутся? Поступают так. Скорости отдельных молекул возводят в квадрат. Это позволяет избавиться от знака (минус в квадрате дает плюс). Складывают эти квадраты, делят на число молекул и вычисляют квадратный корень из полученного числа. Так для нашего примера получают скорость 460 ± 40 м/с. Это уже что-то внятное. Применяют и другие способы вычисления среднего значения.

Полученное нами число позволяет найти много полезных физических величин, например давление кислорода: $p = {}^{1}/_{3}\, m_0 n v^2$. Среднее хорошо работает, когда нас интересуют некие общие параметры ансамбля случайных событий, когда можно отказаться от частностей. Понятно?

Тогда пример на понимание. Если мы ладошкой поймаем одну из молекул кислорода в нашей комнате, то какова была ее скорость сразу перед тем, как мы ее схватили? Из предложенных ниже ответов выберите наиболее правильный:

- ее скорость 460 м/с;
- ее скорость должна быть близка к скорости 460 м/с;
- ее скорость лежит в интервале от 420 до 500 м/с;
- ее скорость лежит в интервале от 0 до скорости близкой к скорости света.

Правильный ответ последний, знание же средней скорости молекул в этом примере абсолютно бесполезно, ибо вопрос касается частности. 460 не есть истинное значение скорости молекулы. Для исчисления истинной скорости конкретной молекулы эти 460 вообще бесполезны!

Еще пример-игра. Допустим, у нас есть 12 учеников и 12 атомов радиоактивного вещества или 12 воздушных шариков, если вам так удобнее (как в нашей анимации по радиоактивности). Пусть каждый ученик выберет себе один атом (шарик). Пусть эти атомы распадаются (шарики лопаются) случайным образом. Пусть каждый сдаст для участия в игре по 100 руб. Тот, чей атом лопнет последним, получит 200 руб. Остальные, понятно, не получают ничего. (Можете поиграть на нашем симуляторе для понимания игры). Допустим, последним лопнул шарик с вашим номером и, естественно, вы заработали 200 руб. Вы счастливы?

А чему вы радуетесь? Вы такой умный, такой везучий, что своим талантом заработали 200 руб. (на самом деле только 100). А только ум и талант здесь не причем. Все свершилось независимо от вас. Так распорядился случай. Кроме того 12 учеников отдали за участие в игре 12 x 100 = 1200 руб. Из них вам была выплачена премия 200 руб. А куда еще делась 1000 руб? Вот. Так устроены все лотереи и азартные игры, в том числе тотализатор. Поэтому я никогда не играю в такие забавы.

Какие бы мы ни выбирали способы подсчета среднего, какой бы статистикой мы ни обладали (например, для предсказания результата очередного матча), случайное остается случайным, и для конкретного случая предсказать исход события не представляется возможным. Только, если случай случайно выберет вас.

Зависимые и независимые

Одни физические величины независимы, они определяются обстоятельствами самого явления. Другие являются зависимыми от них. Эти зависимости и есть самое важное для физики, они составляют суть многих физических законов.

Возьмем закон Ома: $I = U/R$. Этот закон утверждает, что сила тока в проводнике зависит от напряжения на нем и его сопротивления. Верно будет написать и так: $R = U/I$. Однако это не значит, что сопротивление проводника теперь зависит от напряжения и силы тока. Зависимости остаются прежними, физически зависима сила тока, а сопротивление проводника зависит от его свойств, а не от тока в нем ($R = \rho l/S$). Физика не меняется от перестановки величин в формуле.

В математике снова не так. Если у нас есть зависимость $y = 5x$, то справедлива для нее и такая зависимость $x = y/5$. Обе зависимости в математике равноценны, а в физике нет.

Есть величины, которые можно менять непрерывно, а есть такие, которые получается менять только ступенчато. Так сопротивление проводника в цепи можно менять плавно, если этот проводник есть реостат. А вот плавно поменять плотность дерева в опыте не получается. Такова физика плотности дерева. Однако мы часто в симуляторах и анимациях можем видеть, что нам предлагают плавно изменить ускорение свободного падения или работу выхода из металла в фотоэффекте, извините, физически это нонсенс! С точки зрения математики все правильно, но физически не осуществимо. Всегда надо быть осмотрительным с этой математикой в физике!

И еще о микромире и не только (если вам еще не наскучило)

Камень, падая в яму, свою потенциальную энергию превращает во время падения в кинетическую, а, ударившись о дно ямы, теряет всю свою энергию, которая превращается в тепло и рассеивается вокруг.

Частица (ну, скажем, электрон), попавшая в идеальную потенциальную яму с непроницаемыми вертикальными краями, уже не может отдать стенкам ямы свою энергию из-за идеальности стенок ямы, значит, эта энергия должна остаться при ней (по закону сохранения энергии). Энергия – это не жидкость спокойно находящаяся в теле, она должна реализовать себя в физических процессах. Для частицы в яме возможно только колебательное движение, в котором потенциальная энергия частицы слегка приподнятой над дном ямы превращается в ее кинетическую энергию падения при приближении к дну ямы. А затем кинетическая энергия отражения от дна, превращается в потенциальную энергию при подъеме частицы от этого дна. Частица совершает движение от стенки к стенке вправо и влево и плюс то поднимается, то опускается, совершая колебания на некотором расстоянии от дна ямы, достаточном для этих колебаний. Доля каждого вида энергии в таком движении равнозначна, поэтому реализуется и потенциальная и кинетическая энергия в равных долях.

Эти колебания могут затухать за счет излучения энергии вовне, но, если в ширину потенциальной ямы укладывается целое число колебаний, то образуется стоячая волна, при которой отраженные от стенок ямы волны совпадают по фазе и усиливают друг друга. Энергия в данном случае не излучается, а отражается от стенок ямы внутрь. Понятно, такие колебания могут существовать сколь угодно долго, не излучая энергию. Их называют стационарными.

Стационарными могут быть также колебания с частотами, кратными данной: в два, три, четыре и т.д. раз большими. Все они реализуются в потенциальной яме на разных высотах от дна (уровнях энергии). Возможны и переходы частицы с одного уровня на другой. Падая на нижний уровень (с меньшей энергией), частица отдает порцию своей энергии посредством излучения, частота которого определяется разницей энергий верхнего и нижнего уровней; а для того, чтобы частица перешла на более высокий уровень энергии, необходим приток энергии от внешнего источника равной по модулю той же разности.

Как видим, стенки ямы и дно образуют квантовую систему с четкими уровнями квантования энергии частицы.

Из рассмотренного здесь случая вытекают два важнейших для современной физики вывода.

1. Частица может находиться в потенциальной яме на любой высоте от дна ямы, при этом она согласно принципу наименьшего действия будет стремиться к минимуму потенциальной энергии, то есть падать вниз, излучая энергию этого падения, пока не остановит падение на нижнем стационарном уровне. Она может также задержаться и на более высоких стационарных уровнях. Так получаются квантовые уровни. Не из квантовых постулатов, взятых физиками по-простому из головы, а из обыкновенных классических представлений. Наличие границ является достаточным условием для квантования.

2. Первый стационарный уровень находится не на дне, а на некотором расстоянии от него. Имея энергию, частица не может упасть на самое дно.

Нечто подобное должно было бы происходить и с нашим камнем, с которого мы начали эту главу. Но стационарные уровни для камня в гравитационном поле так близко лежат друг от друга, что говорить о реальном квантовании здесь не приходится. Кроме того существует физическая возможность забрать у камня всю его кинетическую энергию в конце падения при ударе о дно. В идеальной потенциальной яме такой возможности просто нет.

Некоторую аналогию и достаточно глубокую можно провести с натянутой гитарной струной. Частицы струны также, можно сказать, находятся в потенциальной яме сил упругости с границами в виде верхнего и нижнего порожков гитары. Достаточно дать частицам некоторую энергию, ударив по струнам, как начнутся те самые колебания, о которых речь шла выше. Всевозможные

колебания быстро затухнут, а вот те, длина волны которых укладывается кратно в расстояние между порожками, образуют стоячую волну в струне, и будут звучать долго. И они когда-нибудь затухнут из-за неидеального отражения колебаний порожками и внутреннего трения в струне. От рассеяния энергии (диссипации) в макромире никуда не денешься.
Гитарная струна та же квантовая система, и никаких тайн в этом нет. Я намекаю на некоторое обожествление квантовой механики многими физиками и особенно популяризаторами науки. Противопоставление квантовой механики и классической физики мне кажется надуманным. Это одна и та же механика.

Электрон, притягиваясь к протону, падает в потенциальную яму сил электрического тяготения и излучает часть своей энергии в виде электромагнитного излучения, пока не достигнет нижней разрешенной орбиты. Оставшаяся часть энергии должна существовать в каком-то виде. Такие возможности делятся между несколькими видами: потенциальная энергия притяжения к ядру, кинетическая энергия вращательного движения, различные виды колебательного движения при перемещении его по орбите.
Откуда же берется «нижняя разрешенная орбита», кем она разрешена?
Из изложенного ранее вам должно быть понятно, что математика может делить величину на сколь угодно малые части, а в физике это не всегда так. Такая величина, как действие (ΔET - изменение энергии ΔE с течением времени T) не может быть меньше минимального значения $h = 6{,}63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с. Электрон в атоме падает на ядро до тех пор, пока следующий этап падения с орбиты на орбиту не будет связан с действием меньшим h. Из всех возможных оставшихся орбит будет реализована такая, где колеблющимся при движении по орбите электроном образуется стоячая волна, при которой, как мы уже говорили выше, энергия не излучается. Другими словами, при какой фазе колебания электрон уходит из данной точки орбиты, в такой фазе и приходит.
На первой стационарной орбите возможностей (число степеней свободы) реализовать свою энергию не так много. На более высоких орбитах эти возможности становятся все более и более реализуемыми. Сами орбиты приобретают все более сложный вид.
На одной орбите могут помещаться только два электрона. Дело в том, что электроны совершенно неотличимы друг от друга, и в одной квантовой системе одинаковые электроны выглядели бы как один. Это не допустимо. Электроны могут отличиться только своим магнитным полем (или спином - направлением вращения вокруг собственной оси). Таких направлений может быть только два: по часовой стрелке или против часовой. Соответственно электронов на орбите может быть только два, чтобы они были различны (различимы).
Если нижняя орбита уже занята двумя электронами, то новые располагаются стационарно на следующих по порядку более высоких орбитах.
Как видим для понимания устройства атома водорода (протон плюс электрон) нам не потребовалось прибегать к квантовым постулатам Бора. Осталось облечь эти идеи в математически обеспеченную теорию, и получим теорию атома водорода.

Совершая колебания и двигаясь по орбите с бешеной скоростью, электрон располагается то ближе, то дальше от ядра. Радиус стационарной орбиты является, таким образом, неким средним расстоянием от ядра, а вероятность найти электрон в любой точке атома отлична от нуля. Это дает некоторым ученым право утверждать, что не существует орбиты электрона как таковой, а есть некое облако вероятности найти электрон в атоме. Электрон как бы расплывается в атоме в облако.
Это уж слишком! Электрон есть однозначно локализованная частица, а не размазанное облако. Мы уже усвоили, что с математическими образами надо быть аккуратными. Тот факт, что орбита

электрона не есть окружность, описанная около ядра, а только наиболее вероятное его местоположение, и тот, что электрон может находиться с большей или меньшей вероятностью вследствие колебательных движений на орбите, не говорит о том, что электрон это повидло, размазанное по атому. Нет, электрон это именно частица, и ни во что он не превращается, попадая в потенциальную яму электрического тяготения ядра атома. Среднее и здесь не применимо к частному, а вероятное может относиться только к очень большому числу оборотов электрона вокруг ядра, а не к частному случаю положения электрона.

Этот длинный пример из квантовой механики здесь приведен только для того, чтобы показать еще раз, что с математикой в физике надо быть очень аккуратным. А то мы уже слышим из уст некоторых ученых, что и физики-то никакой нет, а есть только математика вероятностей, математика волновой функции. Нет материи, а есть только искривленное пространство, как имитация присутствия материальных частиц. Что физика – это не более чем набор правдоподобных рассуждений, с точки зрения Великой математики весьма презренных по этой причине. И прочее, и прочее. На самом деле мы видим, однако, что чрезмерная доверчивость к математическому жонглированию неизбежно приводит к глубоким заблуждениям. Математика в физике есть всего на всего модель физического мира, а не сам мир. Мир много сложнее любых его моделей. Несовершенство этих математических (да и не только) моделей происходит не столько от несовершенства физической науки, сколько от несовершенства математики или от несовершенства ее применения в физике.