

## Учёные готовят фундаментальное обновление единиц измерения [перевод](#)

9 ноября

Источник: <https://geektimes.ru/post/282436/>



Если и есть у учёных священные объекты, то это один из них: единственный, тщательно охраняемый 137-летний металлический цилиндр, расположенный в подвале близ Парижа. Этот прототип точно определяет значение килограмма массы во всём мире.

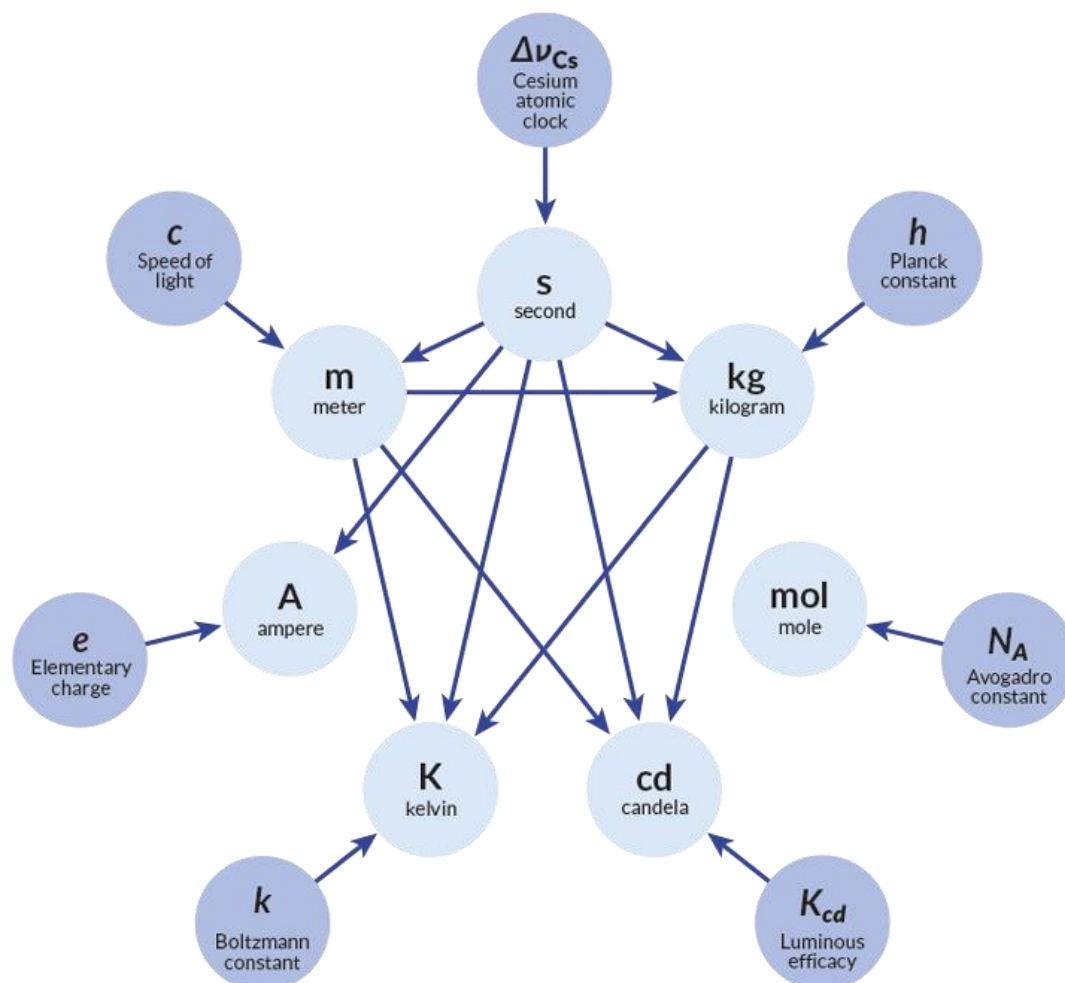
У килограмма говядины в продуктовом магазине та же масса, что и у этого особого куска металла, сплава платины и иридия. У 60-килограммовой женщины масса в 60 раз больше, чем у него. Даже далёкие астрономические объекты, например кометы, измеряются относительно этого цилиндра. У кометы Чурюмова-Герасименко, которую недавно посещал европейский космический аппарат Розетта, масса составляет 10 триллионов таких цилиндров.

Но в этом куске металла нет ничего особенного, и его масса даже не является идеальной константой. Царапины, накапливающаяся грязь, могут незначительно менять его массу. После чего килограмм мяса будет весить чуть больше или меньше, чем раньше. Для гамбургеров эта разница будет несущественной, но для научных измерений небольшой сдвиг в определении килограмма может привести к большим проблемам.

Эта тема волнует некоторых исследователей. Они предпочли бы определить важные единицы измерения – килограммы, метры, секунды – через неизменяемые свойства реальности, а не через наобум взятые длины, массы и другие количества, придуманные учёными. Если бы люди встретились с инопланетянами и сравнили бы системы измерения друг у друга, как говорит физик Стефан Шламмингер [Stephan Schlamminger], «над нами смеялась бы вся Галактика».

Чтобы исправить ситуацию, [метрологи](#) – редкий вид учёных, занимающийся точными измерениями – исправляют систему. Вскоре они начнут использовать фундаментальные константы природы – не изменяющиеся числа вроде скорости света, заряда электрона и постоянную Планка – для калибровки своих линеек, весов и термометров. Они уже избавились от искусственного определения метра –

бруска из платины и иридия с гравировкой. В 2018 году они выбросят и парижский килограммовый цилиндр.



*В 2018 семь единиц международной системы единиц (внутренний круг) будут переопределены через семь констант (внешний круг).*

Фундаментальные константы числятся среди наиболее точно измеряемых параметров, поэтому они и кажутся идеальными для определения единиц измерения. Но они сами по себе – загадки. Постоянная тонкой структуры служит загадкой для физиков с момента её появления в уравнениях 100 лет назад. Каждый раз, когда электрически заряженные частицы притягиваются или отталкиваются – где бы то ни было во Вселенной – эта постоянная играет свою роль. Её значение определяет силу отталкивания и притягивания. Измените её на несколько процентов – и звёзды начнут создавать меньше углерода, основы всей жизни. Ещё чуть-чуть – и звёзды, молекулы и атомы вообще не возникнут. Складывается впечатление, что её значение было подобрано специально для того, чтобы во Вселенной возникла жизнь.

Значения других фундаментальных констант тоже нельзя объяснить – можно только измерить. «Никто не знает, почему у этих констант именно такие значения», - говорит физик-теоретик Джон Барроу [John Barrow] из Кембриджского университета.

Эта неопределённость, окружающая константы, может причинить неудобства метрологам. Законы физики не запрещают константам меняться во времени или пространства – хотя доказательств наличия таких изменений найдено не было. Некоторые спорные измерения намекают на то, что постоянная тонкой структуры

может быть разной в разных частях Вселенной. Это может означать, что и другие константы меняются, а это разрушит всю опрятную систему, к принятию которой готовятся метрологи.

## Коллекция констант

Константа	Символ	Физический смысл	Значение	Определяет
Постоянная Планка	h	Определяет масштабы квантовой механики	$6,626070040 \times 10^{-34}$ кг*м <sup>2</sup> /с	килограмм
Скорость света в вакууме	c	Максимальная скорость движения объекта	299 792 458 м/с	метр
Элементарный заряд	e	Электрический заряд электрона и протона	1,6021766208 $\times 10^{-19}$ ампер*секунд	ампер
Постоянная Больцмана	k	Преобразование энергии в температуру	$1,38064852 \times 10^{-23}$ кг*м <sup>2</sup> /(с <sup>2</sup> *К)	кельвин
Постоянная Авогадро	N <sub>A</sub>	Количество частиц в одном моле вещества	$6,022140857 \times 10^{23}$ /моль	моль; вместе с R <sub>∞</sub> определяет h и затем килограмм
Постоянная Ридберга	R <sub>∞</sub>	Определяет длину волны света, испускаемого атомом водорода	10 973 731,568508/м	килограмм; вместе с N <sub>A</sub> определяет h и затем килограмм
Сверхтонкое расщепление цезия	Δν <sub>Cs</sub>	Частота цезиевых атомных часов	9,192,631,770/с	секунда
Световая эффективность	K <sub>cd</sub>	Преобразование яркости в мощность	683 канделы*стерадиан*с <sup>3</sup> /(кг*м <sup>2</sup> )	кандела
Постоянная тонкой структуры	α	Сила электромагнитного взаимодействия между заряженными частицами	1/137,035999139	используется с другими константами

## Волосая трещина

Плохое самочувствие учёным причиняет не только килограмм. Следующий обвиняемый – кельвин, единица измерения температуры.

«Она сумасшедшая», - говорит физик Майкл де Подеста [Michael de Podesta] из Государственной физической лаборатории в Теддингтоне, Англия. «Человеческие стандарты температуры – это уровень дрожания молекул в странной точке». Эта точка – схожим со священным килограммом образом выбранная наугад – тройная точка воды, определённая температура и давление, при которой сосуществуют жидкая, газообразная и твёрдая фазы воды. Этой температуре назначено значение в 273,16 Кельвинов (0.01° Цельсия).

А ещё есть ампер, обозначающий поток электричества, питающего ноутбуки и лампочки. «Мы годами мучились с определением ампера», — говорит Барри Инглис [Barry Inglis], президент Международного комитета мер и весов. Сегодняшнее слабое определение следующее: это поток, который при протекании по двум бесконечно длинным и бесконечно тонким проводам, расположенным на расстоянии метра друг от друга, приведёт к появлению взаимодействия между ними определённой силы. Но поскольку такие провода сделать невозможно, на практике определять ампер таким образом не очень удобно. В результате

измерительное оборудование сложно откалибровать. Это не проблема для электриков, тянущих проводку в вашем доме, но с точки зрения измерений высокой точности это нехорошо.

Эти примеры показывают уровень дискомфорта, окружающий настолько важные для науки фундаментальные единицы измерения. «В фундаменте наметилась волосяная трещина, и на таком основании здание физики строить нельзя», - говорит Шламмингер из Национального института стандартов и технологии в Геттисберге.

Для заделки трещины учёные хотят обновить международную систему единиц измерения, или СИ, в 2018 году. Килограмм, кельвин, ампер и моль (единицы, измеряющие количество вещества) будут переопределены через связанные с ними константы. Сюда войдут постоянная Планка, определяющая масштабы квантового мира; постоянная Больцмана, соотносящая температуру с энергией; постоянная Авогадро, задающая количество атомов или молекул в моле; величина заряда электрона или протона, также известная, как элементарный заряд. Новые единицы будут основаны на современном понимании физики, включая законы квантовой механики и эйнштейновской специальной теории относительности.

Учёные уже занимались подобными упражнениями, переопределяя метр через фундаментальную константу – скорость света, которая всегда одна и та же.

В 1983 году метр превратился в расстояние, которое свет проходит в вакууме за  $1/299\,792\,458$  долю секунды. Эта последовательность цифр взялась из постоянно уточняемой скорости света. Учёные договорились считать её равной ровно 299 792 458 метрам в секунду, что и определяет метр. Другие единицы подвергнутся схожим изменениям.

Перетряска такого количества единиц происходит «раз в жизни», поясняет физик Дэвид Ньюэл из Национального института стандартов и технологий. Но большинство людей этого не заметят. Определения поменяются, но изменения пройдут так, чтобы размеры килограмма или кельвина не менялись. Вам не придётся переплачивать за салат-бар.

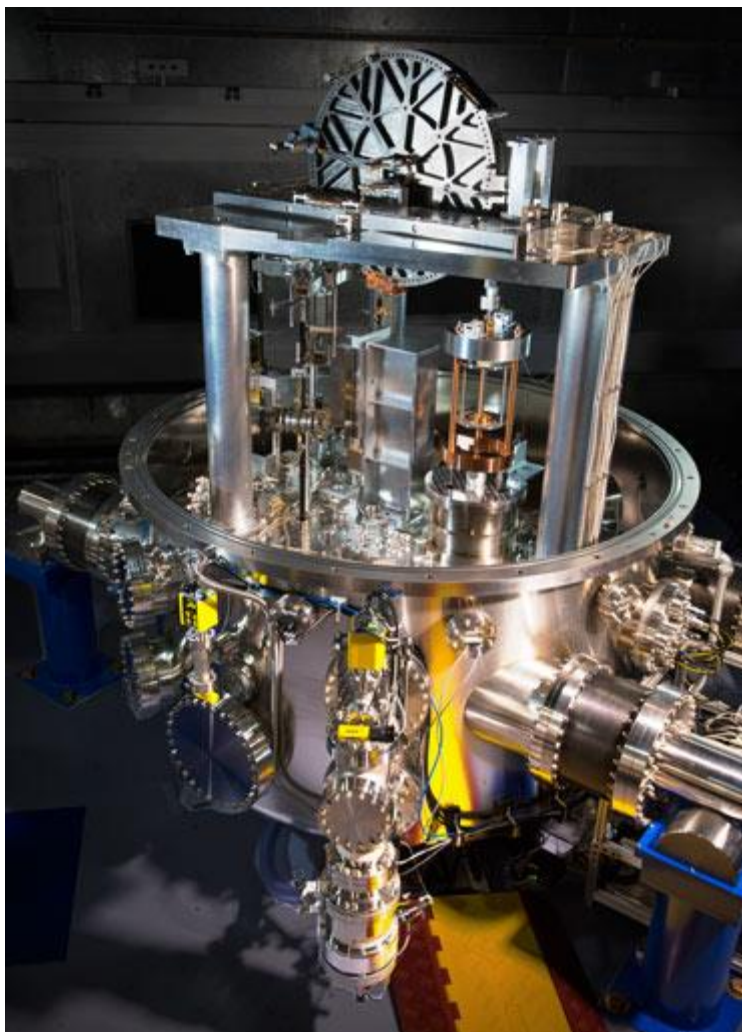
И хотя изменения по большей части будут скрытыми, их преимущества не только философские. В текущей системе тяжело измерять массы, сильно отличающиеся от килограмма. Фармацевтам приходится мерить малые доли граммов для изготовления лекарств. Они могут составлять одну миллионную долю килограммового цилиндра, что повышает неточность измерений. Новая система привяжет массу к постоянной Планка, что позволит точнее проводить измерения как больших, так и малых масс.

В 2018 году на Генеральной конференции мер и весов метрологи проголосуют за изменения в СИ и скорее всего, примут их. Ожидается, что новую систему воспримут с радостью. «Очевидно, что система, в которой можно взять комочек металла и заявить „это килограмм“, не очень-то фундаментальная», - говорит физик Ричард Дэйвис из Международного бюро мер и весов во Франции. «Кто будет тратить свою жизнь, пытаясь таким образом измерить атом?»

## Новый килограмм

Чтобы отправить на пенсию парижский прототип, учёные должны прийти к согласию по поводу значения постоянной Планка. Она равна примерно  $6,62607 \times 10^{-34}$  кг\*м<sup>2</sup>/с. Но её необходимо измерить с особой точностью – до 2 миллионов долей процента, то есть, до семи знаков после запятой – и различные измерения

должны совпасть. После этого значение постоянной будет изменено. Поскольку метр уже определён скоростью света, а секунда – цезиевыми атомными часами, изменение постоянной Планка определит килограмм.



Учёные используют **ватт-весы**, устраивая состязание между электромагнетизмом и гравитацией для измерения постоянной Планка. Ватт-весы на фото изготовлены Стефаном Шламмингером.

Несколько команд используют различные техники измерений. Первая сравнивает электромагнетизм с гравитацией при помощи ватт-весов. Группа Шламмингера находится на последних этапах настройки инструмента. Благодаря точным квантово-механическим методам получения напряжений, масса объекта можно напрямую сопоставить с постоянной Планка.

Другие измеряют константу через изготовленные с большой точностью чрезвычайно блестящие кремниевые шары. «Принцип прост,- говорит метролог Хорст Беттин из Немецкого национального института метрологии, Physikalisch-Technische Bundesanstalt. – Мы просто подсчитываем количество атомов».

Атомы в сфере равномерно расположены в идеальной трёхмерной решётке, поэтому их количество можно подсчитать из размеров сферы. Результирующее измерение постоянной Авогадро можно использовать для подсчёта постоянной Планка, при помощи точного измерения других фундаментальных констант – включая постоянную Ридберга, связанную с энергией ионизации атома водорода. Для таких измерений сферам нужно быть идеально круглыми, чтобы количество атомов можно было подсчитать. «Землю можно было бы сравнить по округлости с

нашими сферами, если бы высочайшие из гор не превышали нескольких метров»,- говорит Беттин.

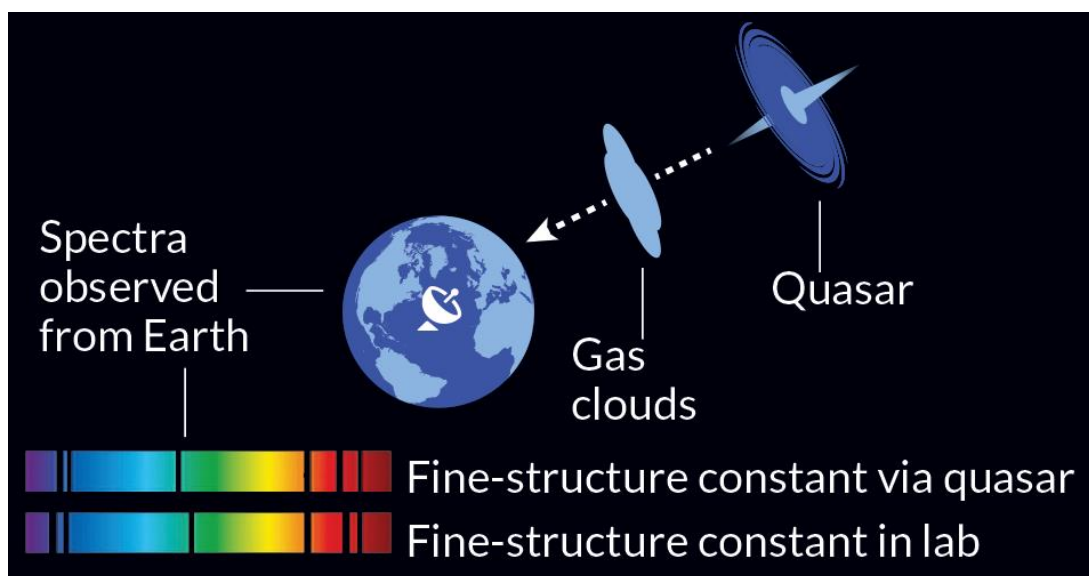
## Подвергая константы сомнению

Представьте себе вселенную, в которой скорость света сильно меняется день ото дня. Если бы там использовалась современная метрологическая система, то «сегодняшний метр отличался бы от завтрашнего»,- говорит Шламмингер – явно неидеальная ситуация. В нашей Вселенной свидетельств такой изменчивости не найдено, и если она существует в очень малых пределах, то практического влияния на систему измерений не окажет.

Но если бы константы не были постоянными, физикам пришлось бы нелегко. Вся физика основана на предположении о неизменности законов, говорит физик Пол Дэйвис [Paul Davies] из Государственного Аризонского университета.

Физики нашли признаки возможной непостоянности в постоянной тонкой структуры. Если это так, получится, что заряженные частицы ведут себя по-разному в разных частях Вселенной.

Постоянная тонкой структуры – сплав нескольких других констант, включая заряд электрона, скорость света и постоянную Планка, и их смесь приводит к числу, примерно равному  $1/137$ . Это внесистемная единица, поэтому в разных системах измерения её значение не меняется.



Учёные отслеживают её через квазары – удивительные космические маяки, возникающие благодаря удалённым сверхмассивным чёрным дырам. По пути к земле свет квазара проходит через облака газа, поглощающие свет на определённых частотах, что и приводит к возникновению разрывов в спектре света. Положение разрывов зависит от постоянной тонкой структуры. Изменения в положении разрывов во времени или пространстве могут означать изменения этой константы.

В 2011 учёные сообщили о провоцирующих намёках на изменения константы. Астрофизик Джон Уэбб из Университета Нового Южного Уэльса с коллегами сообщили, что в одном направлении небесной сферы постоянная тонкой структуры увеличивается, а в другом – уменьшается, будто бы во Вселенной есть особая ось. Утверждение это спорное, и сам Уэбб относит себя к скептикам. «Это, конечно, радикально, и когда вы делаете подобное открытие, вы ему не верите». Но,

несмотря на все попытки опровергнуть эти свидетельства, изменчивость остаётся на месте.

В случае подтверждения наблюдений последствия будут невероятными. «Эффект очень мал,- говорит Дэйвис, — но я думаю, что он окажется шоком, поскольку людям хочется, чтобы законы физики были неизменными. Идея их изменчивости очень беспокоит большую часть физиков».

Некоторые учёные придумали успокаивающие объяснения изменчивости константы. Майкл Мёрфи [Michael Murphy] из Технологического университета Суинберна в Мельбурне предполагает, что в этом стоит винить проблемы калибровки телескопа. Мёрфи был соавтором работы 2011 года, сообщавшей о вариациях в константе. В сентябре Мёрфи с коллегами сообщили, что при использовании телескопа без проблем с калибровкой подтверждает неизменность постоянной тонкой структуры. Но квазары, описанные в этой работе, не исключают наличие изменений в той части неба, которую изучали для работы от 2011 года.

К возможности изменения констант можно отнести и другие загадки физики. Учёные считают, что большую часть вещества Вселенной составляет невидимая тёмная материя. В работе от 2015 года физики Виктор Фламбаум и Евгений Стадник из Университета Нового Южного Уэльса показали, что тёмная материя может изменять фундаментальные константы, взаимодействуя с обычной.

Изменение скорости света может повлиять на современные представления об эволюции Вселенной. Учёные считают, что во время инфляции пространство чрезвычайно быстро расширялось, что привело к возникновению Вселенной, однородной на больших масштабах. Это согласуется с наблюдениями: температура реликтового излучения, или света, возникший через 380 000 лет после Большого взрыва, практически везде одна и та же. Но космолог Жуан Магейжу [João Magueijo] из Лондонского имперского колледжа предлагает альтернативу инфляции: если бы в ранней Вселенной скорость света была выше, это объяснило бы её однородность.

«Если поднять скорость света в ранней Вселенной,- говорит он,- появляется возможность поработать над объяснениями её сегодняшнего состояния».

## Вселенная с точной подстройкой

К ужасу многих физиков, чьи уравнения испещрены фундаментальными константами, эти значения нельзя вывести из физических принципов. Учёным неизвестно, почему электроны притягиваются к заряженным частицам именно с такой силой, и могут лишь измерять её значение и помещать его в формулы. Такие чёрные ящики понижают элегантность научных теорий, пытающихся объяснить Вселенную от начала до конца.

Особенно волнителен тот факт, что точные значения этих констант крайне важны для появления звёзд и галактик. Если бы во время рождения Вселенной определённые константы – в частности, постоянная тонкой структуры – немного отличались бы, то космос был бы пуст и бесплоден.

В результате многие считают, что должна существовать некая теория, ограничивающая эти величины. Но недавние попытки разработки этой теории зашли в тупик, говорит физик-теоретик Фрэнк Уилчек [Frank Wilczek] из MIT. «За последние десятилетия прогресс был невелик».

Некоторые учёные обратились к альтернативному объяснению: константы могут

быть не специально подобраны, но выбраны случайно, и эти броски кубиков происходили много раз во многих вселенных, или в разных частях Вселенной. «Мы поменяли представление о фундаментальных константах. Они уже не так жёстко определены и окончательны», - говорит Бэрроу.

Могут быть и другие вселенные, или же удалённые части нашей Вселенной, где работают другие константы. В тех местах жизнь может и не выжить. Так же, как разнообразная жизнь развилась на Земле, в подходящем климате, а не на Марсе, так и наша Вселенная может обладать константами, склонными к появлению жизни, поскольку только здесь она могла зародиться.

Также увеличивается несоответствие между экспериментальными данными и теоретическими выкладками по поводу констант. Хотя учёные меряют их с потрясающей точностью, и погрешности измерений составляют лишь миллиардные доли, происхождение констант остаётся необъяснимым.

И хотя метрологи пытаются построить их систему на более надёжном фундаменте, привязывая единицы измерения к константам, этот фундамент ещё может покачнуться. Изменяющиеся константы сделают систему менее красивой и аккуратной. Ньюэл говорит, что системе единиц придётся эволюционировать вместе со знаниями и наукой. «А затем можно будет оглядеться и использовать эту систему измерений для дальнейшего изучения окружающего нас мира».

[единицы измерения](#), [система мер](#), [СИ](#), [метр](#), [килограмм](#), [фундаментальные константы](#), [постоянная планка](#), [постоянная тонкой структуры](#),