



# Занимательная Наука

Усенков Дмитрий Юрьевич

## КИЛОГРАММ УХОДИТ НА ПЕНСИЮ, ИЛИ НЕМНОГО ОБ ЭТАЛОНАХ

20 мая 2019 года запомнится всем, кто имеет хоть какое-то отношение к физике и метрологии. В этот день мир облетела новость: эталон килограмма – последний остававшийся физический эталон системы Си – списан в архив и заменен эталоном электронным. Но что это за электронный эталон массы? И что стало с остальными эталонами? Давайте разберемся.

### Для чего нужны эталоны

Когда речь заходит об измерениях чего бы то ни было, всегда всё сводится к сравнению измеряемого параметра с некоторым образцом. Например, чтобы измерить расстояние, надо сравнить его с какой-то другой длиной; для измерения веса предмета его традиционно взвешивают, сравнивая с весом стандартных гирек, и т. д. Но тут же возникает вопрос: а что выбрать в качестве такого образца?

За всю историю человечества этот вопрос решали по-разному. И чаще всего такими образцами (эталоны) становились параметры человеческого тела или предметов, которые его окружали. Причем почти у каждого государства или нации в ходу были свои собственные единицы измерения, и это сильно затрудняло международные деловые и торговые отношения.

Так, в древнем Египте использовались меры длины, которые в самом буквальном смысле всегда под рукой, – сами руки! Один

локоть как расстояние от локтя до кончика среднего пальца на выпрямленной руке был равен семи ладоням (ширина ладони без учета большого пальца), а одна ладонь равнялась, соответственно, четырем пальцам. Конечно, это вызывало многочисленные споры и ошибки из-за того, что длина руки и ширина пальцев у разных людей различна, а в таком, например, точном деле как строительство пирамид и иных грандиозных сооружений подобные ошибки были недопустимы.

В Англии этот отрицательный опыт отчасти учли, хотя тоже пользовались аналогичными средствами измерения. Так, английский фут – это (что для знающих англий-



*...это вызывало многочисленные споры и ошибки из-за того, что длина руки и ширина пальцев у разных людей различна...*

ский язык вполне очевидно) длина ступни, но не чьей-нибудь, а конкретного человека: английского короля. А ярд, по преданию, который был впервые введен английским королем Эдгаром, – это расстояние от кончика королевского носа до кончика среднего пальца вытянутой вперед королевской руки (рис. 1). Была определена и более мелкая величина длины – дюйм, равный длине крайней фаланги (той, на которой ноготь) большого пальца. (При этом в разных странах дюймы имели различную длину, но обычно подразумевался английский дюйм, равный 2,54 см, – желающие могут определить, какой рост имела героиня одноименной сказки Дюймовочка и как бы она выглядела вместе с русским «мальчиком с пальчик»).

Подобные меры длины были, впрочем, в ходу и в древней Руси, и было их достаточно много. Существовал русский локоть (определяемый точно так же, как и древнеегипетский), аршин как расстояние от плеча до кончика среднего пальца, маховая сажень – полное расстояние между кончиками средних пальцев рук, вытянутых в стороны, и отдельно – косая сажень (расстояние от кончиков пальцев вытянутой вверх руки до пальцев противоположной ей ноги), пядь – расстояние между концами указательного и большого пальца при наибольшем их раздвижении и другие (рис. 2).



Рис. 1. Старинные английские меры длины

Такой же разноразбой был и с мерами веса и объема. Например, в Англии существовало целых две величины, именуемых «тоннами»: тонна большая, или длинная, равная 1016,05 кг, и тонна малая (короткая), равная 907,185 кг. А, скажем, американская тонна равнялась 907,18 кг. На Руси вес и объем определяли фунтами (1 фунт равен 400 граммам), пудами (1 пуд равен 16 кг), ведрами (12 литров) и сорокаведерными бочками, а еще кулями, гарнецами, берковцами, лотами, золотниками и целым рядом других единиц измерения.

Разобраться во всем этом многообразии было куда как сложно – надо было иметь очень большой опыт и внимательность в торговых делах, чтобы не быть обманутым (например, говорят, что купцы предпочитали нанимать продавцов маленького роста, у которых локоть покороче, чтобы получить побольше выгоды). Поэтому вполне естественным стало желание жителей разных стран договориться об использовании каких-то единых для всех единиц и эталонов их измерения. И благодарить за это весь мир должен прежде всего ученых из французской Академии наук, которая в XXVIII веке была «законодательницей мод» в мировой науке.

В 1791–1795 гг. Национальное собрание Франции приняло постановление о введении

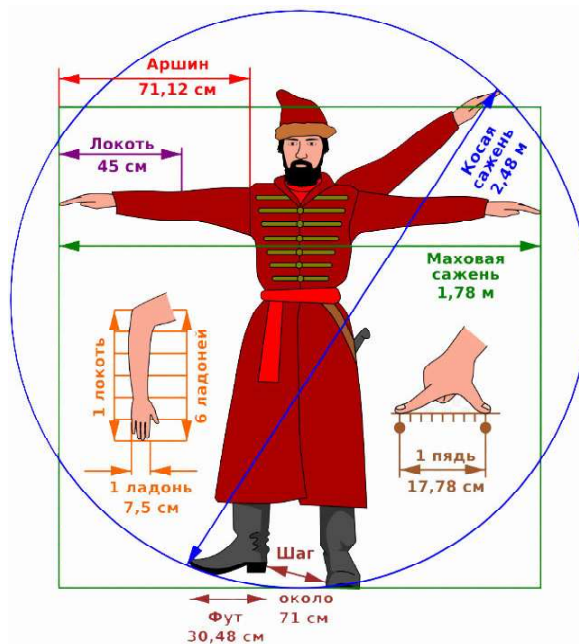


Рис. 2. Старорусские меры длины

первого эталона длины – метра, равного одной десятиллионной доле половины земного меридиана, проходящего через Париж. Это положило начало формированию современной метрической системы: 7 апреля 1795 года метрическая система впервые была официально принята во Франции и содержала шесть основных единиц измерения: метр, акр (мера площади, равная 100 м<sup>2</sup>), стер (сегодня это – кубический метр), литр, грамм и франк (французская денежная единица тоже была включена в метрическую систему наравне с физическими величинами). Тогда же появились и десятичные приставки к названиям единиц измерения, которые мы используем и сегодня в рамках системы СИ. А в декабре 1799 года во Франции был издан закон, по которому метрическая система стала единственной в стране.

Следующий шаг по внедрению метрической системы в науку (конкретно – в физике) был сделан в Германии. В 1832 году немецкий ученый Карл Фридрих Гаусс предложил систему мер СГС (сантиметр-грамм-секунда), основанную на таких величинах как миллиграмм и миллиметр, которая была принята мировым научным сообществом как базовая в научных исследованиях.

Инициативу подхватили британские ученые. В 1863 году они предложили концепцию целостной системы единиц, где единицы длины, массы и времени были определены как «фундаментальные» (базовые) единицы, а все другие единицы измерения (производные) выводились из базовых. При этом в качестве базовых величин были выбраны «три кита» современной метрологии: *метр, килограмм и секунда* (соответственно новая метрическая система получила сокращенное название МКС).

В России внедрение международной метрической системы было начато в 1899 году благодаря трудам русского ученого Дмитрия Ивановича Менделеева. Впрочем, закон (проект которого разработал Д. И. Менделеев) от 4 июня 1899 года лишь допускал международные системы мер к применению в необязательном порядке, и только 30 апреля 1917 года декретом Временного прави-

тельства, а затем 21 июля 1925 года постановлением Совнаркома СССР метрическая система мер в нашей стране стала обязательной. Сегодня использование метрической системы в России обязательно и регламентируется ГОСТ 8.417–2002, где указаны разрешенные к применению единицы физических величин, их международные и русские обозначения.

Прежние же величины измерений стали достоянием истории, литературы и... пословиц и поговорок. «Семь пядей во лбу» – обычно говорим мы об умном человеке. «Словно аршин проглотил» – о щеголе, который пыжится ходить прямо, демонстрируя всем свою горделивую осанку. «От горшка – два вершка» – о малыше, а «косая сажень в плечах» – о русских богатырях (попробуйте сами разобраться со смыслом этой поговорки). «Вместе пуд соли съели» – о закадычных приятелях, долгое время делящих кров и пищу.

Одновременно с появлением базовых физических величин потребовалось ввести и конкретные, понятные, удобные для использования эталоны – то, с чем можно было бы сравнивать измеряемые расстояния, массу и время. Причем эталоны длины и массы должны были быть вещественными – понятие метра как доли Парижского меридиана для реальных измерений, конечно же, было неподходящим. Да и, например, грамм как масса одной миллионной кубометра чистой воды при ее максимальной плотности тоже не слишком удобен, тем более что добиться этой самой максимальной плотности воды



«Вместе пуд соли съели»

и точно отмерить нужный объем очень просто.

В итоге было договорено для грамма (и килограмма) и для метра сделать некие металлические эталоны, которые должны храниться в Палате мер и весов в Париже. По образцу этих мировых эталонов изготавливались эталоны-копии, которые рассылались в другие страны и хранились в их государственных палатах мер и весов (так, в России Главная палата мер и весов была учреждена в 1893 году в Санкт-Петербурге по инициативе Д. И. Менделеева и являлась центральным учреждением Министерства финансов). А уже по этим государственным эталонам изготавливали (и поверяли) все используемые гири, «метры» и прочий измерительный инструментарий, которым пользовались все. Этот механизм обеспечения всех стран – участниц договоренности об использовании метрической системы был закреплен важным международным документом – Метрической конвенцией, которую 20 мая 1875 года подписали семнадцать стран. Метрической конвенцией, в частности, была установлена процедура координации метрологических эталонов для мирового научного сообщества через Международное бюро мер и весов и Генеральную конференцию по мерам и весам.

Именно Генеральная конференция по мерам и весам стала инициатором последнего на данный момент шага – разработки и принятия международной системы единиц СИ (сокращение *SI* от начальных букв первых двух слов французского названия метрической системы «*Le Système International*

*d'Unités*»). В 1960 году она была принята на XI Генеральной конференции по мерам и весам, и в течение второй половины XX века на нее перешло большинство стран мира. Однако этот процесс еще до сих пор не завершен: читателям, наверное, интересно будет узнать, что переход к системе СИ не завершен не только в таких странах, как Гайана, Антигуа и Сент-Люсия, но и в Великобритании, что в Китае наряду с единицами СИ до сих пор используются и древнекитайские названия величин и что в США система СИ до сих пор официально не принята, так же как в Либерии и Мьянме (Бирме).

### Эталон метра

Итак, эталон метра определялся в СИ как доля длины Парижского меридиана, а для удобства был изготовлен его металлический эталон. При этом крайне важно было обеспечить его стабильность – неизменность длины при изменении внешних условий (хотя в Палате мер и весов и без того старались поддерживать неизменный микроклимат) и прочность, чтобы металл не истирался при сравнениях с главным эталоном времени от времени изготавливаемых заново или поверяемых эталонов, рассылавшихся в разные страны. Поэтому эталон метра представлял собой платиново-иридиевый стержень X-образного сечения длиной 1020 мм, на плоскости которого при температуре ровно 0 °С было нанесено по три штриха с каждой стороны, так чтобы расстояние между средними штрихами составляло ровно 1 метр (рис. 3).

Из такого же платиново-иридиевого сплава изготавливали и региональные эта-

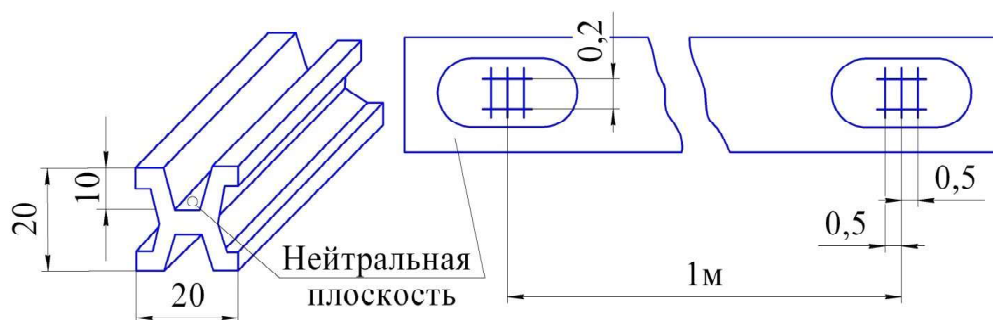


Рис. 3. Схематическое изображение эталонного метра

лоны метра (рис. 4), тщательно выверенные по главному парижскому эталону.

Эталонный метр служил людям верой и правдой достаточно долгое время. Но времена менялись, росла необходимая точность измерений длины. При сравнении эталонов погрешность измерений могла составлять 0,1–0,2 мкм, а в современных технологиях должна обеспечиваться точность уже в единицы нанометров. Поэтому возникла необходимость в утверждении нового эталона метра, которым стал... свет!

Радуга – семь цветов, хорошо известных каждому с детства благодаря стишку: «Каждый охотник желает знать, где сидит фазан». Как известно, это красивое природное явление рождается благодаря разложению солнечного света в спектр при его преломлении в капельках воды. И точно так же можно разложить белый свет в спектр, пропуская его через стеклянную призму, – эксперимент, с которым школьники знакомятся в самом начале изучения такого раздела физики как оптика.

Почему же свет, проходя через призму, раскладывается в спектр? Физика дает ответ и на этот вопрос: световые волны различной длины, которые мы воспринимаем глазами как разные цвета, преломляются на различающиеся (хотя бы чуть-чуть) углы, и потому свет образует такую характерную радужную полоску. Если же свет будет монохромным (имеет строго одно значение длины волны, как, например, в лазерном излучении), то он при пропускании через призму так и будет давать лишь одну тонкую спектральную полосу.

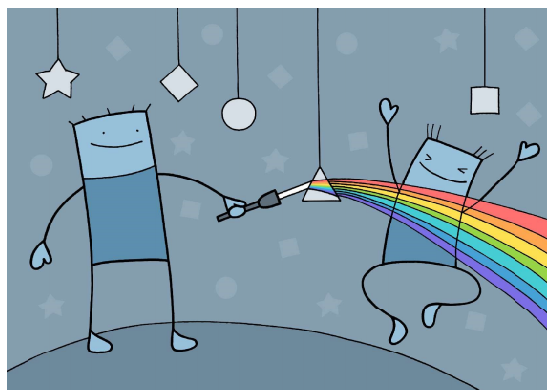
Исследуя разложение в призме света, получаемого от различных источников, ученые еще в начале XIX века заметили: спектр может оказаться не сплошным, на нем могут наблюдаться тонкие черные линии, и наоборот, некоторые источники света дают спектр, состоящий из набора отдельных тонких полосок. Причина этого явления стала понятна только при исследованиях в области ядерной физики: выяснилось, что световые волны испускаются при переходе электрона в атоме с одного энергетического уровня на другой, а поглощение светового кван-



Рис. 4. Фото эталонов метра

та атомом может, наоборот, переводить электрон на более высокий энергетический уровень. Но и раньше при наблюдениях удалось заметить: световые волны, излучаемые или поглощаемые тем или иным веществом, всегда одни и те же (на спектре соответствующие им полосы всегда располагаются на одних и тех же местах), а значит, спектр излучения (светлые полосы) или спектр поглощения (темные полосы на сплошном спектре) представляют собой необходимый и достаточный признак каждого вещества, своего рода его «паспорт». Это наблюдение позволило создать такой прибор как *спектрометр*, позволяющий по спектральным полоскам точно определять химический состав веществ.

Именно неизменность длины световой волны, излучаемой определенным веществом (точнее – определенным изотопом химического элемента), стала основой для создания нового эталона длины.



...свет, проходя через призму, раскладывается в спектр...

Саму идею в качестве единицы длины принять длину определенной линии в спектре предлагал еще в 1829 году французский физик Ж. Бабине. А когда американский физик А. Майкельсон изобрел еще один прибор, основанный на волновых свойствах света, – *интерферометр*, позволяющий очень точно измерять расстояния, сравнимые с длиной световой волны, появилась возможность превратить свет в эталон расстояния. В 1927 году было определено, что 1 метр соответствует 1553164,13 длины волны красной линии кадмия-114, и это значение всегда и везде строго неизменно. Такое определение метра было допущено в качестве стандарта наряду со старым металлическим прототипом, а в 1960 году XI Генеральная конференция по мерам и весам при разработке системы СИ уже официально приняла в качестве эталона метра значение, выраженное в длинах световых волн излучения инертного газа криптона – Kr-86.

Именно с тех пор металлический эталон метра, хранившийся в Парижской палате мер и весов, ушел в историю и был заменен физическим измерением при помощи интерферометра, что обеспечило точность измерения метра до  $1 \cdot 10^{-8}$  м. А в 1983 г. уже XVII Генеральная конференция по мерам и весам приняла новое определение: 1 метр – это единица длины, равная пути, проходимому светом в вакууме за  $1/299792458$  долю секунды.

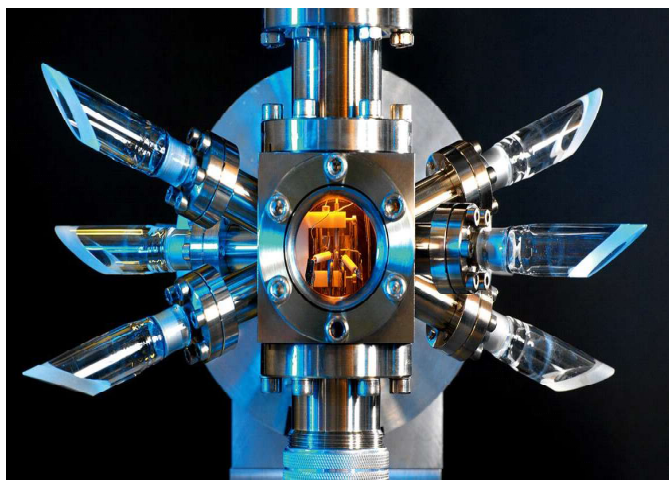


Рис. 5. «Сердце» атомных часов

### Эталон секунды

С таким «нематериальным» понятием, как время, конечно же, возникли существенно большие сложности, чем с метром и килограммом. Первоначально время вообще измеряли очень приблизительно, и только с появлением *маятника с анкерным механизмом* удалось создать хронометры с секундной точностью.

В международной метрической системе, принятой в сороковых годах, секунда определялась как  $1/86400$  часть средних солнечных суток. В 1956 году это определение скорректировали, и секунду стали определять как часть года (периода обращения Земли вокруг Солнца), но точность измерения секунды в этом случае проблематична, не говоря уже о том, что скорость орбитального полета нашей планеты, а значит, и длительность года со временем изменяется. Точное определение секунды, принятое при разработке системы СИ, звучало следующим образом: « $1/31\,556\,925,9747$  доля тропического года для 0 января 1900 в 12 часов эфемеридного времени», определенная на основе астрономических наблюдений, сделанных между 1750 и 1892 гг.

Положение изменилось, когда в 1949 году были изобретены *атомные часы* (рис. 5), позволяющие измерять время за счет колебаний, связанных с внутриатомными процессами. Такие часы принципиально не способны «отставать» или «спешить», ибо атомы по своей природе не способны «сломаться» (за редким исключением ядерных реакций) и обеспечивают поистине уникальную стабильность измерения времени – отклонение измеряемой частоты колебаний обычно лежит в пределах  $10^{-14}$  –  $10^{-15}$ , а в специальных конструкциях – до  $10^{-17}$ .

В итоге в 1967 году XIII Генеральная конференция по мерам и весам определила секунду атомного времени следующим образом: «*Секунда есть время, равное  $9\,192\,631\,770$  периодам излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями ос-*

новного состояния атома цезия-133.». Чуть позже выяснилось, что точность атомных часов может быть увеличена, и в 1997 году на совещании Международного комитета мер и весов определение секунды было уточнено: «*Это определение относится к атому цезия, не возмущённому внешними полями при температуре 0 К.*» (реально, конечно, высокоточные измерения секунды выполняются с учётом внешней температуры, при которой работают атомные часы, и затем экстраполируются к значению секунды при абсолютном нуле).

И, наконец, совсем недавно, в 2018–2019 гг., определение секунды было изменено на аналогичное, но сформулированное более точно: «*Секунда, обозначение  $s$ , является единицей времени в СИ; её величина устанавливается фиксацией численного значения частоты сверхтонкого расщепления основного состояния атома цезия-133, равным в точности 9 192 631 770, когда она выражена единицей СИ Гц, что эквивалентно  $s^{-1}$ .*».

### Эталон килограмма

Последний из «трех китов» метрологии – килограмм. До 20 мая 2019 года этот эталон был последним из трех, изготовленных людьми, а не самой природой. Как и эталон метра, он хранился в Международном бюро мер и весов (современная Палата мер и весов) и представлял собой цилиндр диаметром и высотой 39,17 мм из платино-иридиевого сплава (90 % платины, 10 % иридия), изготовленный еще в далеком 1889 году. При этом предпринимались все мыслимые меры не только для обеспечения стабильности микроклимата, но и для изоляции эталона от банальной пыли, ибо даже малейшие пылинки могут изменить вес этого эталона (рис. 6).

Может показаться, что такой эталон массы со временем будет неизменен. Но в ходе сверок государственных эталонов килограмма с хранящимся в Париже главным эталоном, выполненных в 1889, 1948, 1989 и 2014 гг., выяснилось, что металлические цилиндры... самопроизвольно меняют массу. Некоторые эталоны за сто с лишним лет «по-

худели» за счет испарения материала, а другие, наоборот, «растолстели» за счет диффузии. Изменения эти, казалось бы, ничтожны – всего на 20–50 микрограммов, но в современном мире такая неточность уже является критической.

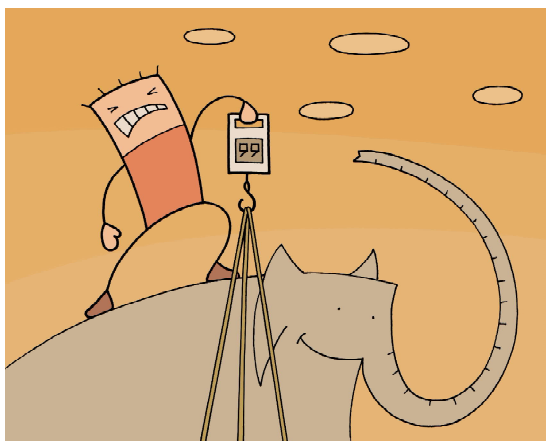
По этой причине в мае нынешнего 2019 года XXVI Генеральная конференция по мерам и весам постановила: килограмм, как и его «собратья» – метр и секунда, должен стать «*атомным*». Так что мера массы теперь определяется через *постоянную Планка*, значение которой фиксировано и равно  $6,62607015 \cdot 10^{-34}$  кг·м<sup>2</sup>/с. Но как взвесить абстрактную физическую величину?

Для этого используется особый прибор, который был разработан в Национальной физической лаборатории (Великобритания) в 1975 году и носит название «*весы Киббла*» по имени его разработчика Брайана Киббла (рис. 7). Другое, более точно отражающее принципы работы этого устройства название, – «*ватт-весы с движущейся катушкой*».

Принцип работы весов Киббла следующий. Если в обычных пружинных весах (примером которых является обычный безмен) вес определяется при уравнивании силы тяжести и силы упругости пружины, то в весах Киббла сила тяжести, действующая на взвешиваемый объект в специальной чашке, уравнивается магнитными сила-



Рис. 6. Эталон килограмма под стеклянными защитными колпаками



*...в обычных пружинных весах... вес определяется при уравнивании силы тяжести и силы упругости пружины...*

ми, порождаемыми катушкой электромагнита. После этого выполняется вторая часть измерения: уже пустая чашка весов движется в магнитном поле, и за счет электромагнитной индукции определяется плотность магнитного потока в зазоре постоянного магнита. Скорость движения электромагнитной катушки при этом определяется при по-

мощи лазерного интерферометра, обеспечивающего необходимую высокую точность.

Предусмотрено, впрочем, и новое материальное воплощение килограмма – сфера из изотопа кремния-28 максимально возможной степени очистки (рис. 8). Кремний избран в качестве основного материала потому, что, благодаря развитию полупроводниковых технологий, в мире уже освоены способы получения «чистого» кремния. Кроме того, атомная структура кремния хорошо известна, а у любой достаточно оснащенной лаборатории есть возможность воссоздать сферический килограмм (только делать это потребует в вакууме). Далее при помощи современных методов исследования можно определить кристаллическую структуру кремния, а затем, зная точную массу атома кремния-28 и точное значение еще одной физической константы – числа Авогадро ( $6.02214076 \cdot 10^{23}$ , с точностью до 20 миллиардных), можно «отвесить» требуемое количество атомов кремния (определить точный радиус сферы) и тем самым воспроизвести

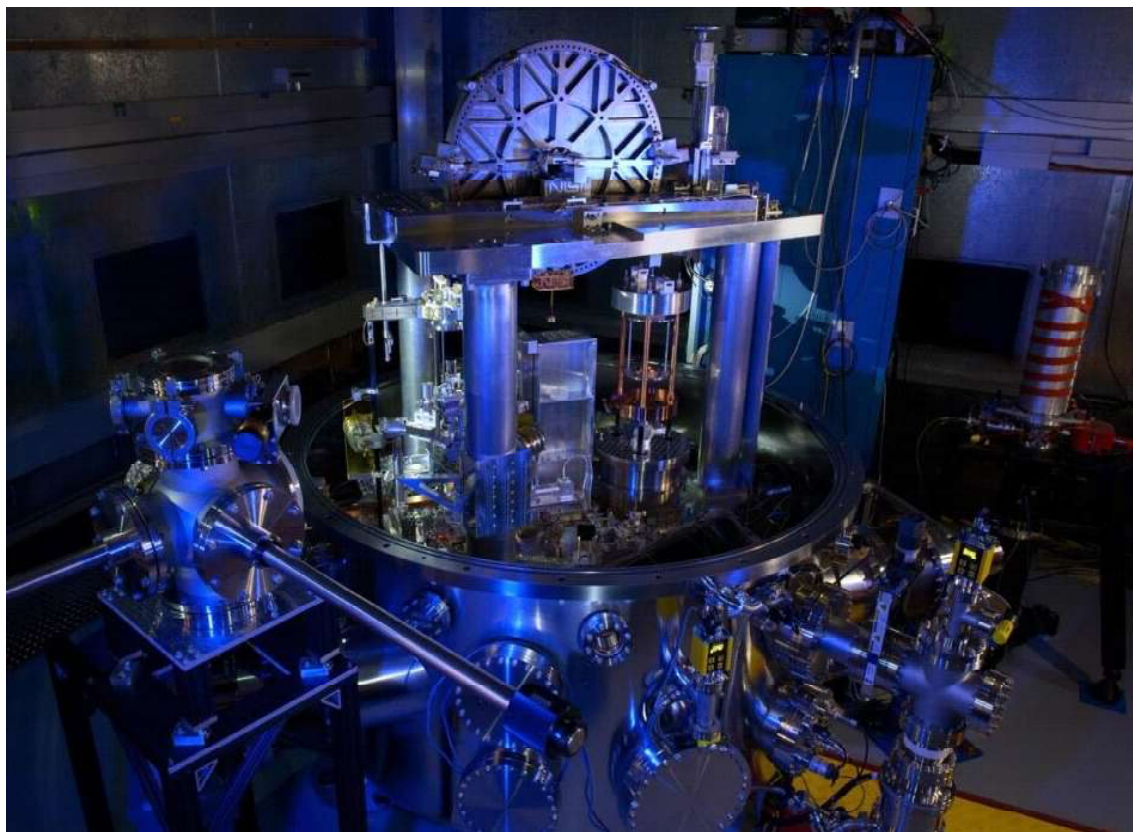


Рис. 7. Весы Киббла – Ватта NIST-4 (фото NIST – National Institute of Standards and Technology)



с высокой точностью весовой эталон килограмма.

Таким образом, с мая 2019 года все три базовых эталона стали *атомными*. Впрочем, в России старому килограмму пока еще пенсионный возраст повысили: согласно проведенным замерам, масса российского эталона за 20 лет изменилась всего на 1 микрограмм, так что он может сохранить свою точность в необходимых пределах еще 10 лет, а результаты его последней сверки с главным эталоном действительны до 2024 года. К этому сроку российские ученые обещают разработать свои отечественные весы Киббла и создать с требуемой точностью свой независимый эталон килограмма – благо международным эталоном, по сути, теперь является не сам эталон, а эталонная схема его изготовления.



**Рис. 8.** Преведний платино-иридиевый (справа) и новый эталон килограмма (слева) – кремниевая сфера (фото *NIST – National Institute of Standards and Technology*)

*Усенков Дмитрий Юрьевич,  
ГБОУ СОШ № 1360, г. Москва.*

