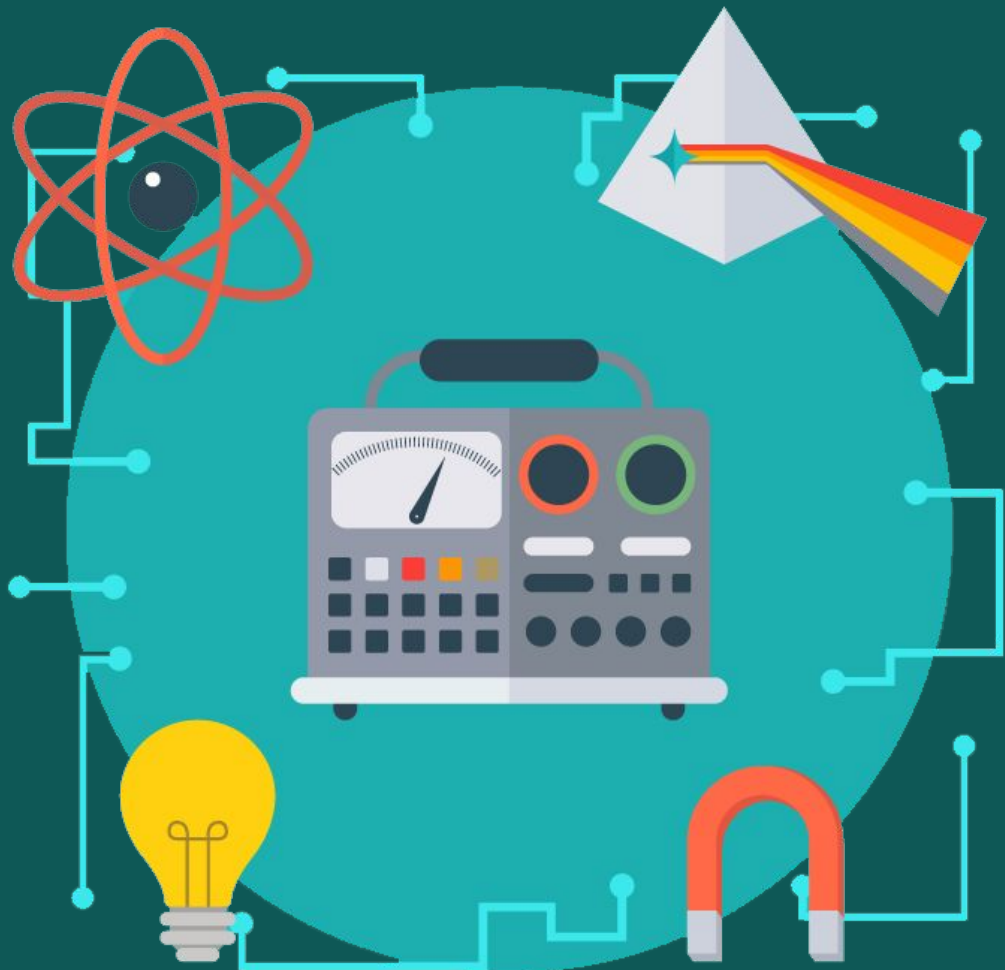


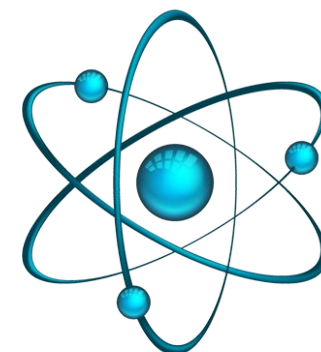
# ПРАКТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА



Доцент кафедры  
экспериментальной  
физики  
Ерина Марина Васильевна

# Лекция № Измерение физических величин

- Эталоны
- Метод анализа размерностей



# Эталоны

Человек занимался измерениями с древних времён. Это было нужно для строительства, изготовления различных изделий, торговли и планирования деятельности. Каждое государство изобретало свои меры. Ещё полтора века назад в нашей стране размеры мерили вершками, пядями и аршинами, массу - фунтами и пудами, а в качестве мер объёма жидкости можно было встретить чарки и вёдра. В Великобритании, например, до сих пор в ходу дюймы, футы, фунты и пинты.

Потребность в единой системе мер существовала всегда, но со стремительным развитием науки и техники в Новое время она стала просто жизненно необходимой. Интенсивный обмен знаниями и технологиями требовал всё более точных измерений.



1. le Litre (Pour la Pinte)

2. le Gramme (Pour le Livre)

3. le Mètre (Pour l'Aune)

4. l'Are (Pour la Toise)

5. le Franc (Pour une Livre Tournois)

6. le Stere (Pour la Denue Voie de Bois)

Déposé à la Bibliothèque le 20 Janvier An 8. 1. Paris chez les Citoyens des Arts et des Sciences, chez le Citoyen de la Ville de Paris.

Французская гравюра, около 1800 года, иллюстрирующая метрическую систему мер.

1 – литр;

2 – грамм;

3 – метр;

4 – ар (100 м<sup>2</sup>);

6 – стер (эквивалент 1 м<sup>3</sup>, определялся по объёму определённым образом сложенных деревянных брусков). Любопытно, что на пятом месте денежная единица — франк, так как параллельно была сделана попытка реформы запутанной денежной системы введением в неё десятичного деления.

# Первые эталоны

В 1795 году во Франции государство официально приняло метрическую систему мер, базирующуюся на мерах длины и массы. Основная идея этой системы состояла в том, что преобразование всех единиц измерения сводится к простому умножению или делению на степень числа 10.

Для универсальности все введённые меры были привязаны к природным объектам, казавшимся тогда одинаковыми повсюду. **Единица длины - метр** приравнивался к одной сорокамиллионной доле длины парижского меридиана. **Единицу массы - грамм** - определили как массу кубического сантиметра воды при 4°C, когда вода имеет наибольшую плотность, а **секундой** назвали  $1/86\,400$  суток.

В 1875 году в Париже семнадцать стран, включая Россию, подписали Метрическую конвенцию, согласно которой создавались эталоны массы и длины. Их оригиналы должны были храниться в штаб-квартире Международного бюро мер и весов в пригороде Парижа - Севре. А метрологические организации участников конвенции получали точные копии эталонов.





Имперские стандарты длины 1876 года на Трафальгарской площади в Лондоне





Эталоны длины на стене обсерватории в Гринвиче





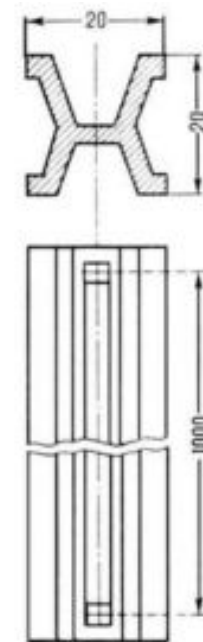
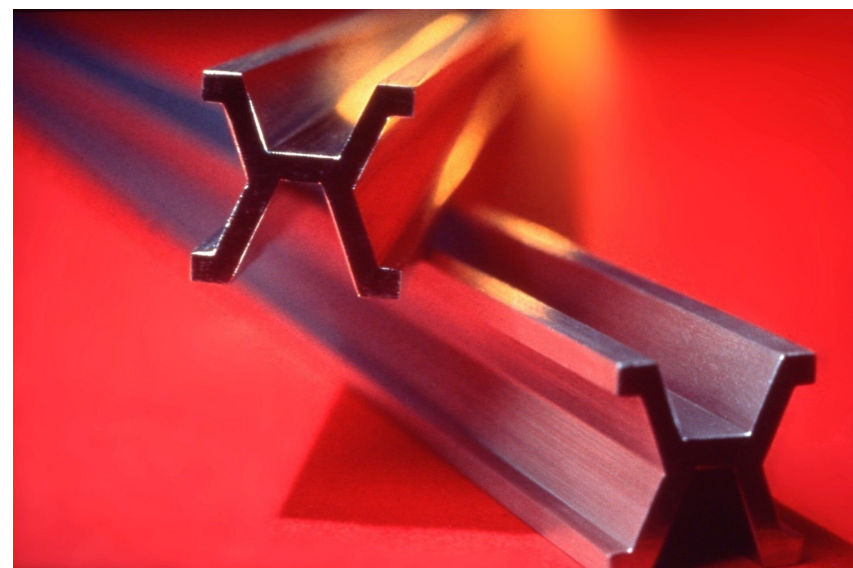
Один из публичных эталонов метра, установленных на улицах Парижа в 1795 - 1796 гг.



**Килограмм** – цилиндр из сплава 90% платины и 10% иридия, высота и диаметр которого равны 39,17 мм (хранится в международном бюро мер и весов в Париже).



**Международный эталон метра**, использовавшийся с 1889 по 1960 год (платиново-иридиевый)



# Основные единицы системы СИ произведены с большой точностью и их результаты закреплены в эталонах

**Метр** – длина равная 1650763,73 длины волны в вакууме излучения, соответствующего переходу между уровнями  $2p^{10}$  и  $5d^5$  атома  $^{86}\text{Kr}$  (эталон 1960 г.)

**Метр** – длина отрезка, которую свет проходит в вакууме за  $1/299792458$  долю секунды (эталон 1983 г.)

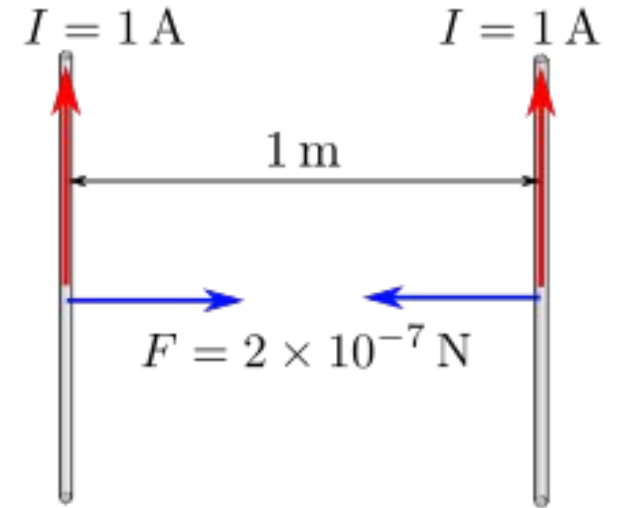
В 1997 г. Консультативный комитет по длине рекомендовал принять за **новый эталон** измерения длины – длину волны излучения стабилизированного He-Ne/ $\text{I}_2$  лазера  $\lambda=632,9913822$  нм. Такой эталон позволяет определить метр с ошибкой, не превышающей 0,02 нм, т.е. с точностью до одного атомного слоя.

**Секунда** – равна 9192631770 периодам излучения, соответствующего переходу между двумя уровнями сверхтонкой структуры основного состояния атома цезия  $^{133}\text{Cs}$ .

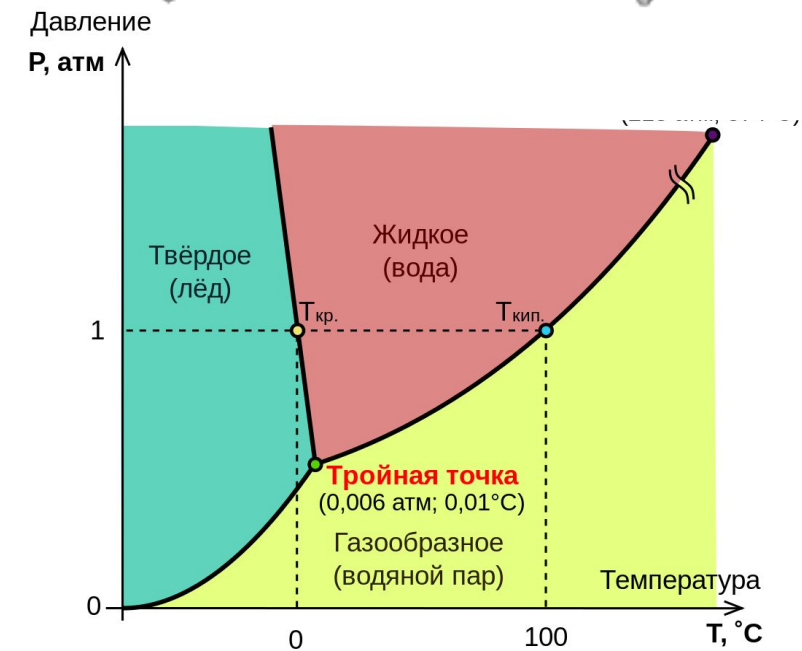
**Кандела** – сила света источника, монохроматическое излучение которого частотой  $540 \cdot 10^{12}$  Гц ( $\lambda=555$  нм – **зеленый цвет**) излучаемое в телесный угол в 1 стерадиан имеет мощность 1/683 Вт.



**Ампер** – равен силе постоянного электрического тока, который протекая по двум параллельным бесконечно длинным проводам с пренебрежимо малым круговым сечением, находящимися в вакууме на расстоянии 1 м друг от друга, вызывает на участке проводника длиной 1 м силу взаимодействия  $2 \cdot 10^{-7}$  Н.

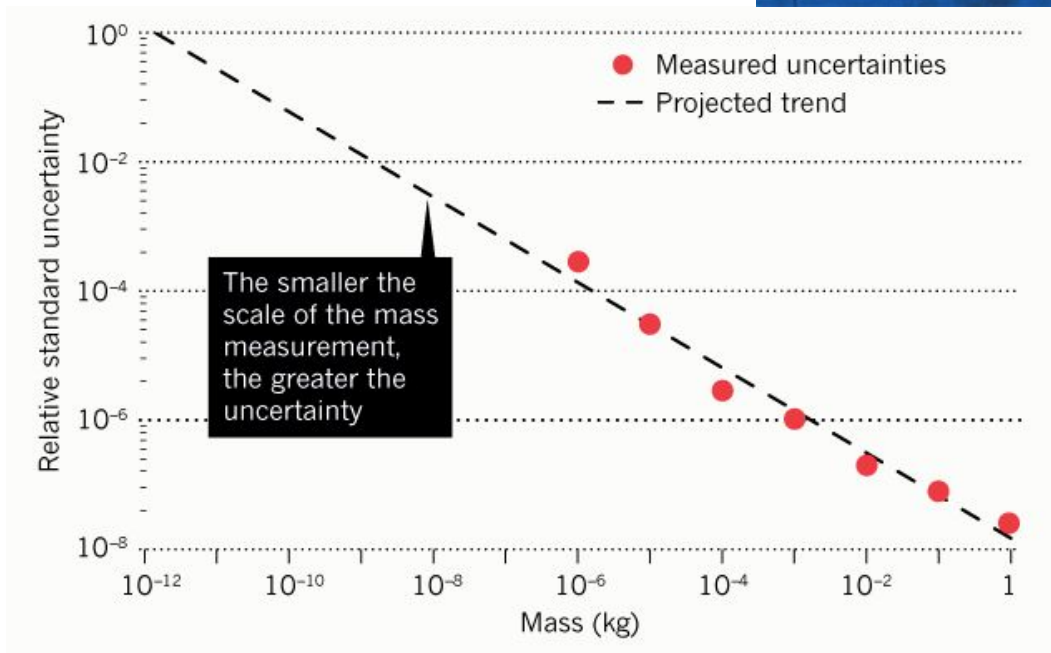
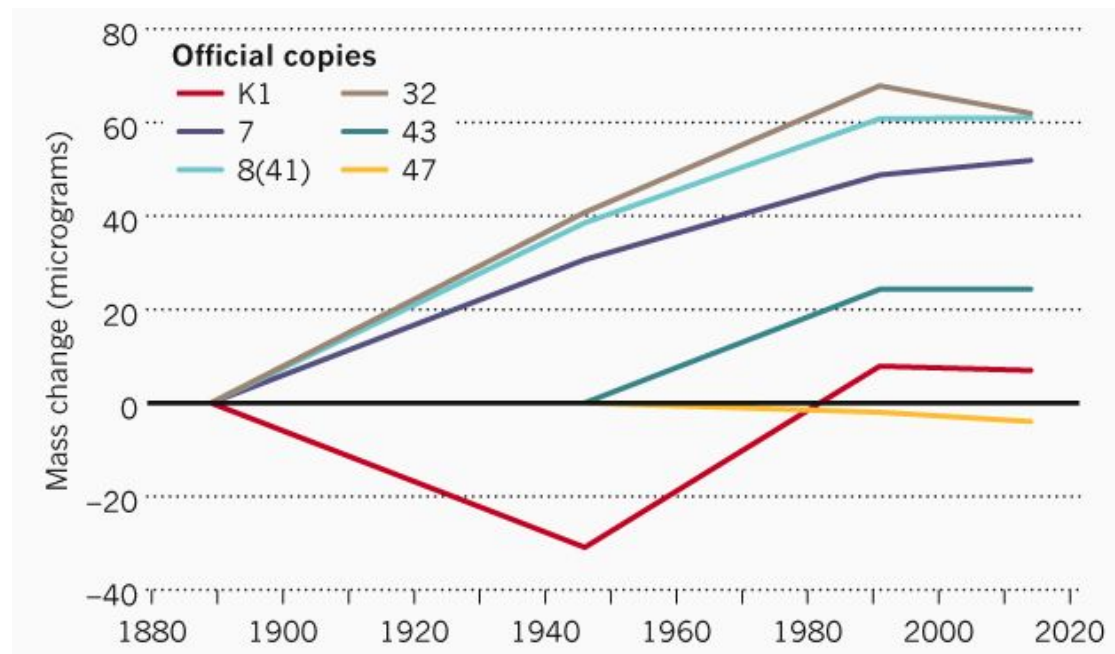
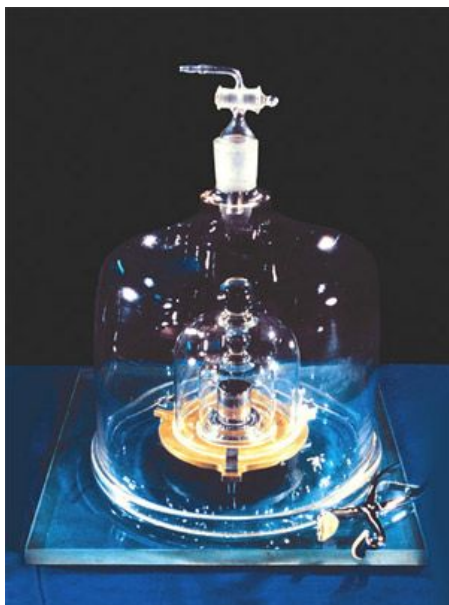


**Кельвин** – равен  $1/273,16$  части термодинамической температуры тройной точки воды.



**Моль** – количество вещества, в котором содержится столько же частиц, сколько и в  $0,012$  кг изотопа углерода  $^{12}\text{C}$ .

# Килограмм





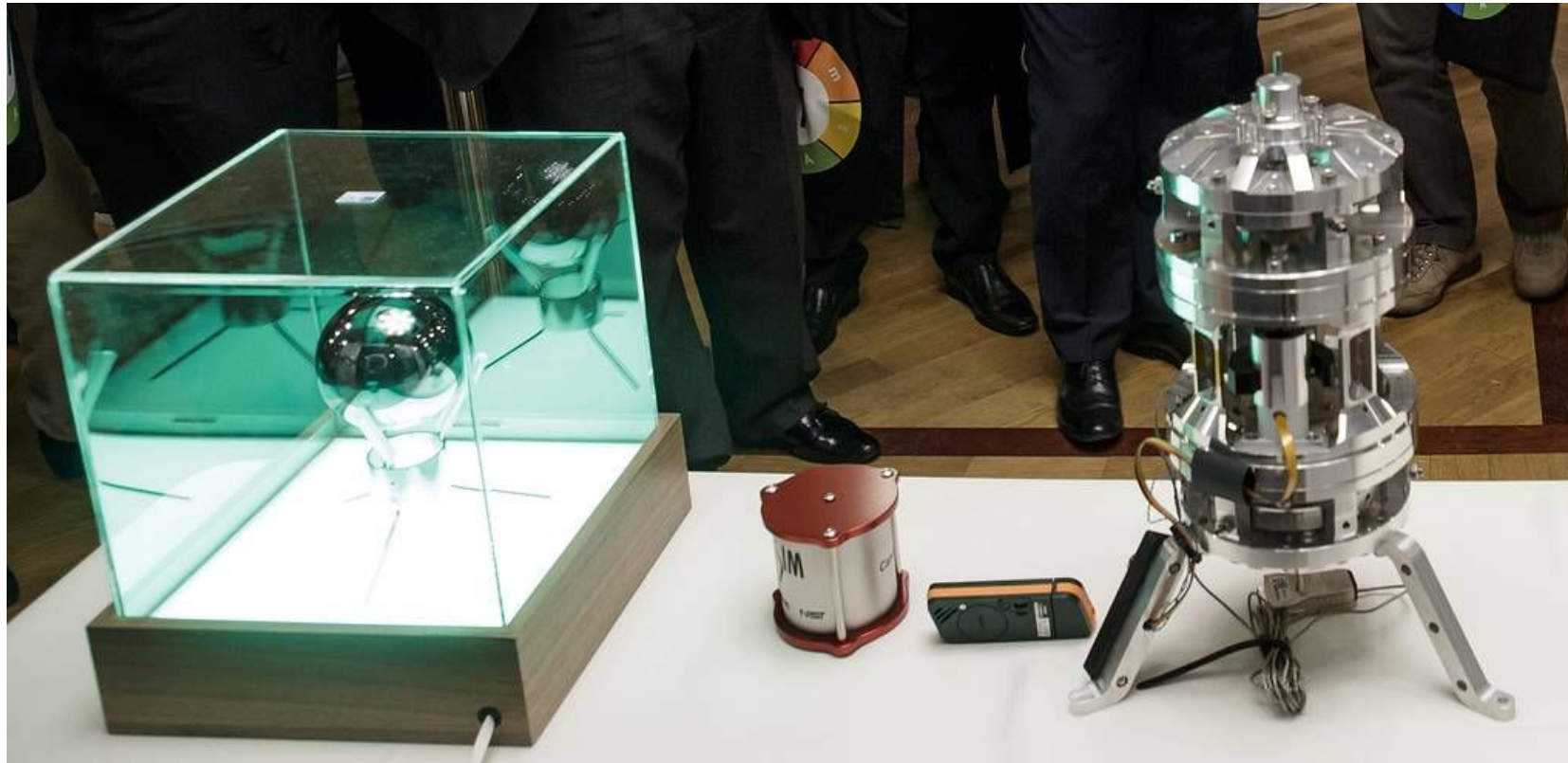
# Пересмотр системы единиц СИ

В 2018 г. Международное бюро мер и весов провело самую значительную реформу в международной системе единиц (СИ) со времени последней большой ревизии этого стандарта в 1960 году.

В настоящее время СИ принята в качестве основной системы единиц большинством стран мира и почти везде используется в области техники. Предыдущий стандарт утверждён в СССР 1 января 1963 года ГОСТом 9867-61 «Международная система единиц».

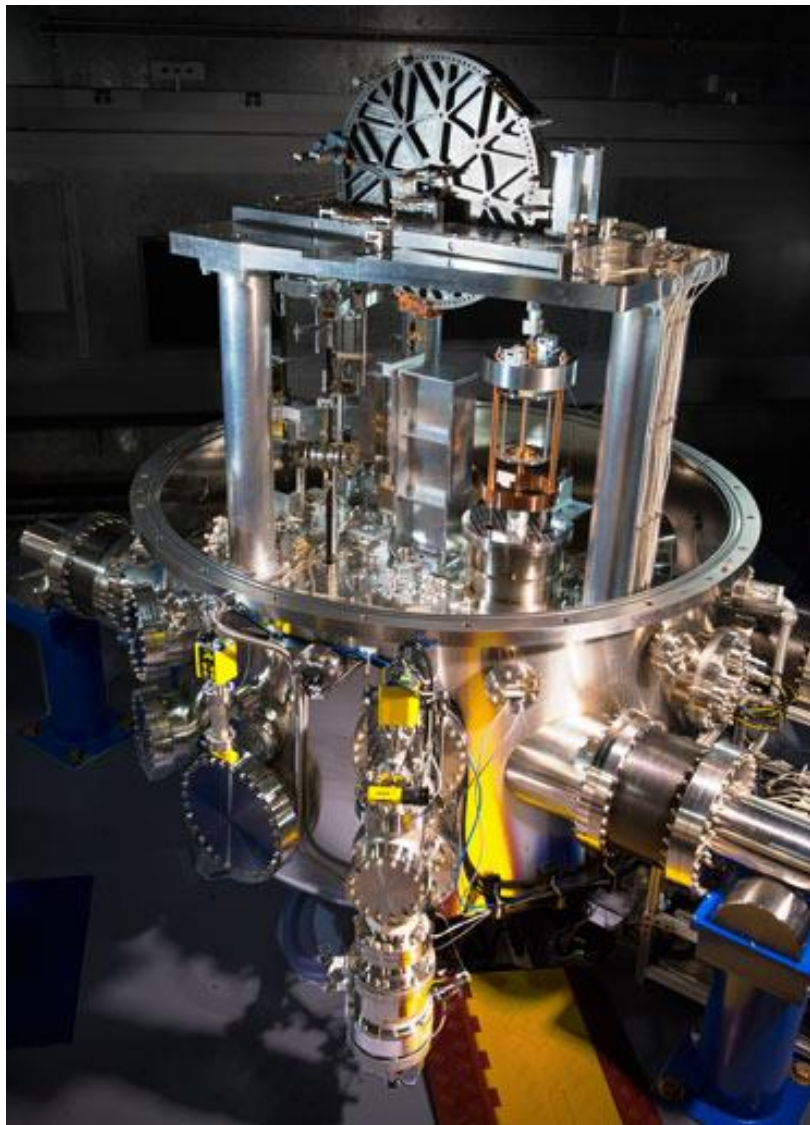
Руководство международной организации проголосовало за предложенные изменения на **Генеральной конференции по мерам и весам в 2018 году**, а с мая 2019 года изменения вступили в силу.

МОСКВА, 20 мая 2019 г. /ТАСС/. Принципы расчета эталонных значений килограмма, ампера, кельвина и моля Международной системы СИ меняются во Всемирный день метрологии, который отмечается 20 мая. Новые определения были утверждены в ноябре 2018 года в Версале на 26-й Генеральной конференции по мерам и весам.



Устройство "баланс Киббла" для измерения электрического тока





Учёные используют весы Киббла, устраивая состязание между электромагнетизмом и гравитацией для измерения постоянной Планка.

Принцип работы ампер-весов основан на законе Ампера: на провод длиной  $L$  с протекающим по нему электрическим током  $I$  при внесении его в магнитное поле с индукцией  $B$ , будет действовать сила величиной  $BLI$ . Если провод нагрузить массой  $m$ , то при установлении равновесия появится соответствие между силой тока и массой  $m$ :

$$mg = BLI \quad (1)$$

Точность ампер-весов на практике ограничена точностью измерения константы  $BL$  в (1).

Киббл предложил оригинальное решение, позволяющее избежать измерения  $BL$ . В весах Киббла измерение производится в два шага. На одном из них масса уравнивается током точно так же, как и в ампер-весах. На втором шаге происходит «калибровка»: ток в проводнике (на практике, в обмотке) отключается, проводник протягивается через то же магнитное поле с постоянной и точно замеренной скоростью  $v$ . При этом по закону Фарадея на концах проводника образуется напряжение:

$$U = BLv \quad (2)$$

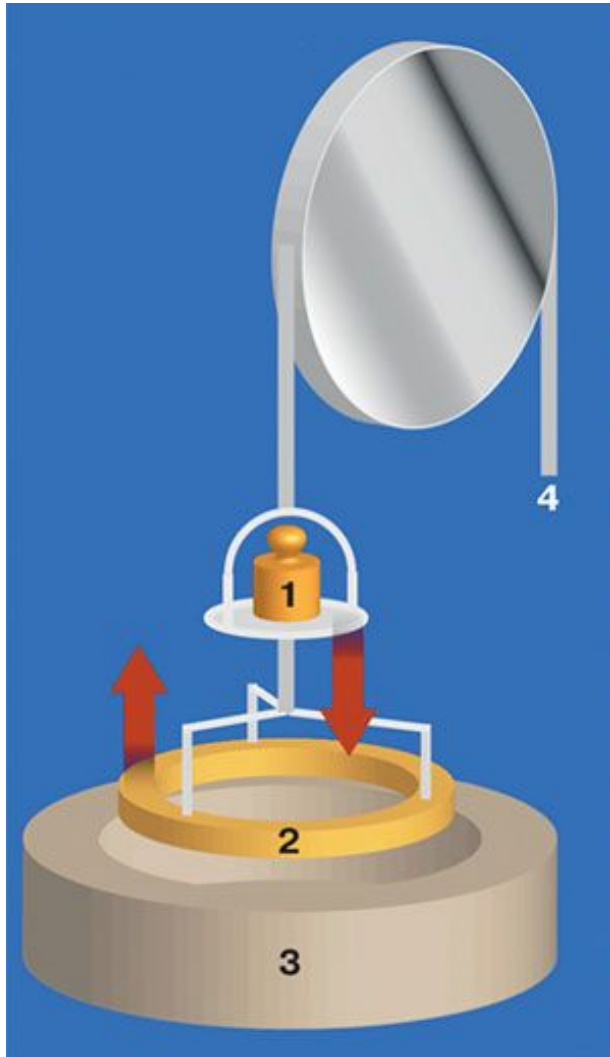
Поскольку величина  $BL$  на обоих шагах одинакова, то из (1) и (2) получаем равенство:

$$\frac{U}{v} = BL = \frac{mg}{I} \quad \longrightarrow \quad UI = mgv$$

$UI$  имеет размерность мощности, но это виртуальная мощность, так как измерения напряжения и тока проходят в разное время. Двухэтапный процесс измерения позволяет, среди прочего, избежать эффектов от потерь (которые могли бы быть вызваны, например, наведёнными токами Фуко).



**1 килограмм** равен постоянной Планка, поделенной на  $6,626070040 \cdot 10^{-34} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$



Основные элементы весов Киббла:

1 – поддон со взвешиваемым грузом;

2 – катушка, по которой протекает ток;

3 – постоянный магнит;

4 – конец троса, ведущий к двигателю, который может перемещать поддон и катушку по вертикали.

Красными стрелками показаны уравновешенные силы тяжести и магнитного отталкивания.

<https://youtu.be/Oo0jm1PPRu0>

**Килограмм** – количество электрической энергии, которое необходимо, чтобы сдвинуть с места объект весом в килограмм. Энергия, в свою очередь, будет рассчитываться на основе постоянной Планка (эталон 2019 г.).



Изготовление копии эталонного килограмма

На практике, взвешивание на весах Киббла – это чрезвычайно сложный эксперимент, и потому Генеральная конференция по мерам и весам в 2011 году рекомендовала создать набор вторичных стандартов в виде привычных гирек, включая как существующие платино-иридиевые эталоны, так и новые сферы из кремния, которые будут далее использоваться для распространения эталона по миру.



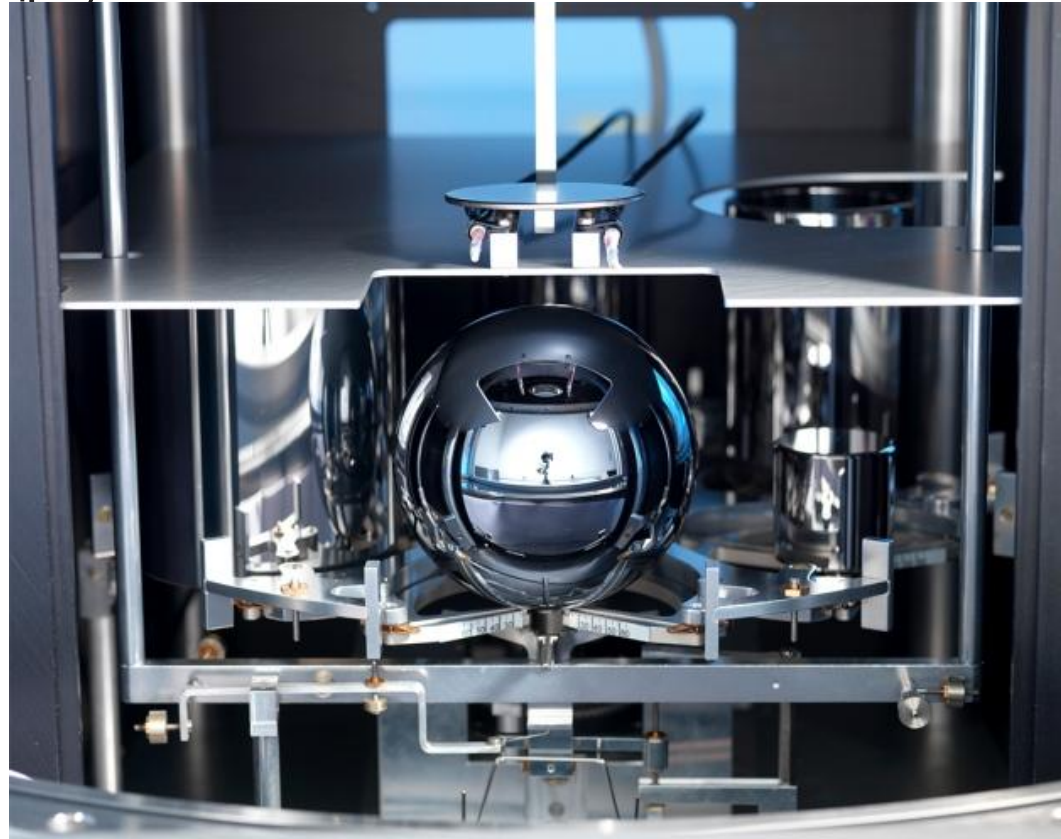
**1 Кельвин** соответствует изменению тепловой энергии на  $1,38064852 \cdot 10^{-23}$  Дж. Для выражения единицы требуется постоянная Больцмана.

Измерять точную температуру можно с помощью измерения скорости звука в сфере, заполненной газом. Скорость звука пропорциональна скорости перемещения атомов.

**1 Ампер** - электрический ток, соответствующий потоку  $1/1,6021766208 \cdot 10^{-19}$  элементарных электрических зарядов в секунду. Для выражения единицы требуется заряд электрона.

На практике для определения Ампера понадобится только один инструмент – одноэлектронный насос. Такие инструменты создали несколько лет назад. Они позволяют перемещать определённое количество электронов в течение каждого насосного цикла, что является крайне ценным качеством для фундаментальной науки и метрологии.

**1 моль** - количество вещества системы, которая содержит  $6,022140857 \cdot 10^{23}$  специфицированных структурных единиц. Для выражения единицы требуется постоянная Авогадро (число Авогадро).



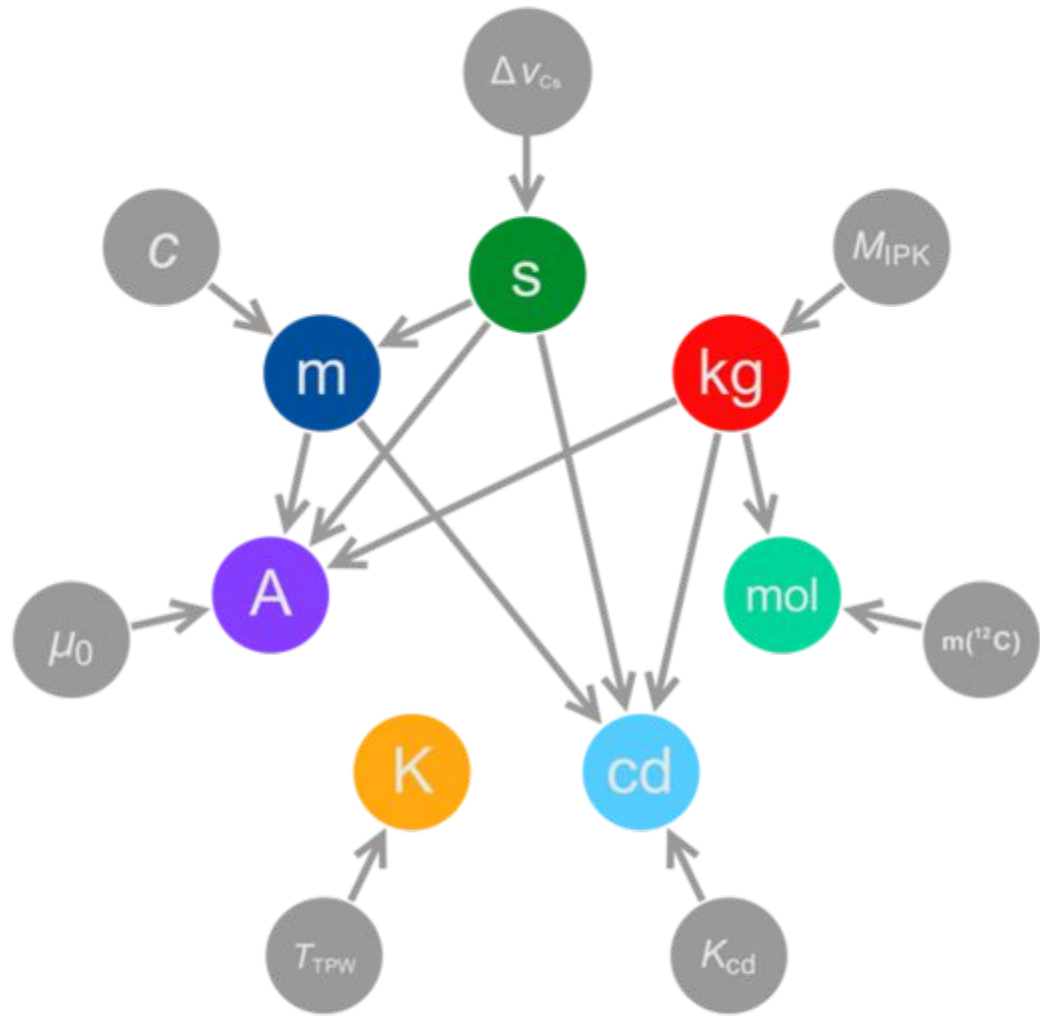
Сфера из кремния-28 с чистотой 99,9998% может быть использована для вычисления максимально точного числа Авогадро



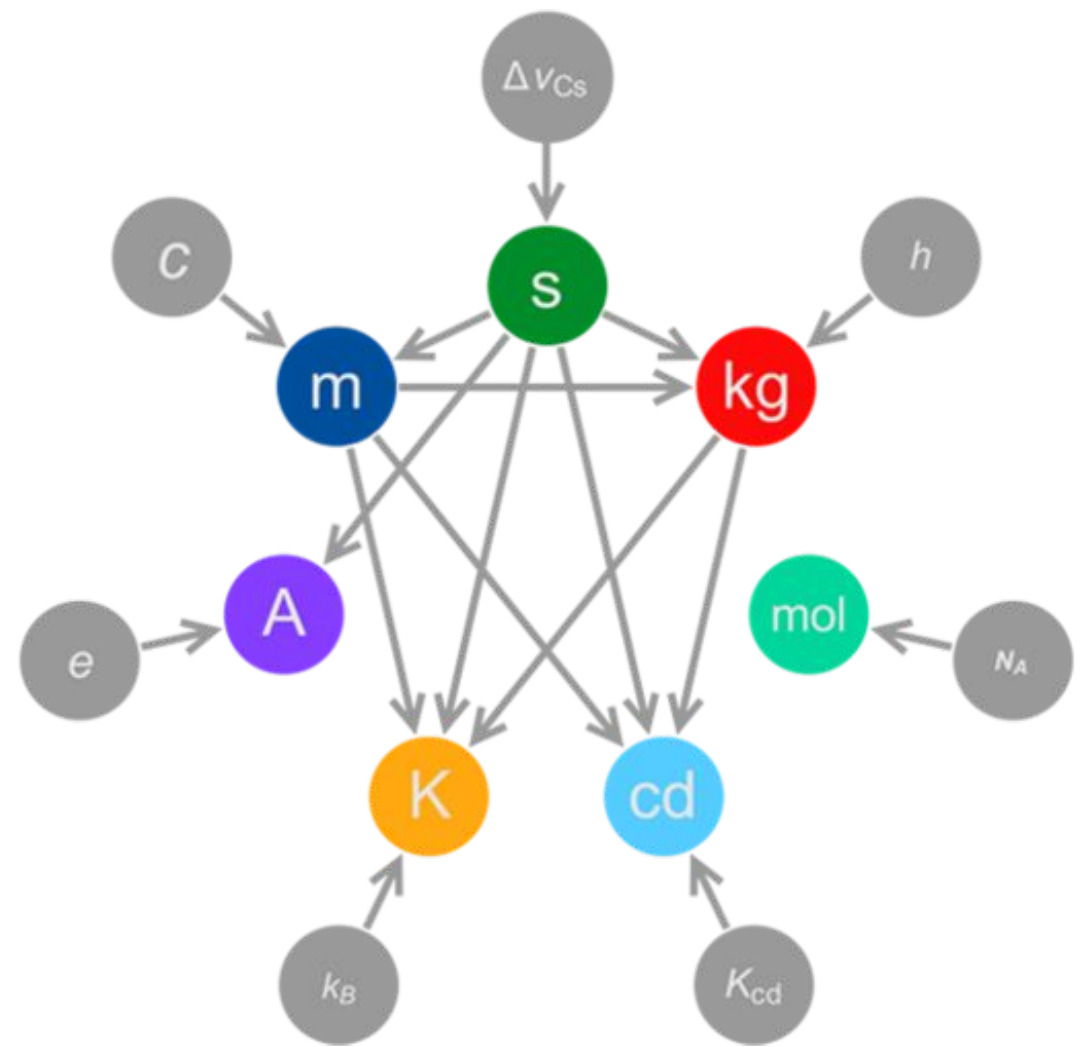
Кремниевая сфера рядом со старым эталоном килограмма



## Old SI



## New SI



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	$N_A$	Количество частиц в одном моле вещества	$6,022140857 \times 10^{23}$ моль <sup>-1</sup>	моль; вместе с $R_\infty$ определяет $h$ и затем килограмм
Постоянная Ридберга	$R_\infty$	Определяет длину волны света, испускаемого атомом водорода	$10\,973\,731,568508$ м <sup>-1</sup>	килограмм; вместе с $N_A$ определяет $h$ и затем килограмм
Сверхтонкое расщепление цезия	$\Delta\nu_{Cs}$	Частота цезиевых атомных часов	$9,192,631,770$ с <sup>-1</sup>	секунда
Световая эффективность	$K_{cd}$	Преобразование яркости в мощность	683 канделы·стерадиан·с <sup>3</sup> /(кг·м <sup>2</sup> )	кандела
Постоянная тонкой структуры	$\alpha$	Сила электромагнитного взаимодействия между заряженными частицами	$1/137,035999139$	используется с другими константами

# Метод анализа размерностей

**Размерность** физической величины показывает, как связана данная величина с основными физическими величинами. Размерность основных физических величин в СИ обозначают прописными буквами:

Длина	$L$
Масса	$M$
Время	$T$
Сила электрического тока	$I$
Температура	$\theta$
Количество вещества	$N$
Сила света	$J$



Размерность произвольной физической величины  $G$  обозначают

$$\dim(\mathbf{G}) = L^\alpha M^\beta T^\gamma I^\delta \Theta^\lambda N^\mu J^\eta$$

где  $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \lambda, \mu, \eta$  – некоторые числа.

Если все они равны 0, то величина  $\mathbf{G}$  – безразмерная.

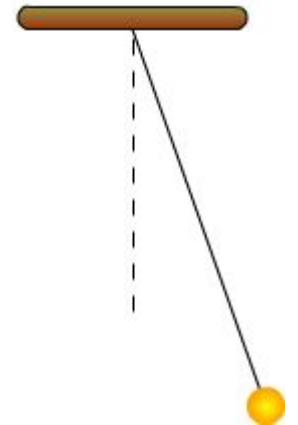
**Пример:** рассмотрим кинетическую энергию

$$\dim(E_{\text{к}}) = \left[ \frac{mv^2}{2} \right] = ML^2T^{-2}$$

Физическая величина и её размерность это не одно и то же. Совершенно разные величины могут иметь одинаковые размерности. Размерность не содержит информации о том, является ли данная величина скаляром, вектором, или тензором. Однако размерность имеет большое значение для проверки правильности соотношений между физическими величинами.

Если предварительно известно, какие величины необходимо учитывать при анализе того или иного процесса, то путем анализа размерностей можно установить характер зависимости, связывающей эти величины. Такой метод носит название **метода анализа размерностей**. Этот метод наиболее эффективен, когда нахождение искомой зависимости встречает значительные математические трудности.

**Пример:** рассмотрим задачу об определении периода колебаний математического маятника. Необходимо найти формулу для вычисления периода колебаний, если известна длина маятника и ускорение свободного падения.



$$T = A \cdot l^\alpha \cdot g^\beta \cdot m^\gamma$$

$$T = A \cdot L^\alpha \cdot (LT^{-2})^\beta \cdot M^\gamma$$

$$T = A \cdot L^{\alpha+\beta} \cdot T^{-2\beta} \cdot M^\gamma$$

$$\alpha + \beta = 0; \quad -2\beta = 1; \quad \gamma = 0$$



$$\beta = -1/2;$$

$$\alpha = 1/2$$

$$T = A \sqrt{\frac{l}{g}}$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

Т.о. период колебаний не зависит от массы маятника



**Пример:** необходимо найти формулу для вычисления давления газа, если известна его плотность и средняя квадратичная скорость его молекул

$$p = A \cdot v^\alpha \cdot \rho^\beta$$

$$\dim(p) = \left[ \frac{F}{S} \right] = MLT^{-2}L^{-2} = ML^{-1}T^{-2}$$

$$\dim(v) = LT^{-1}$$

$$\dim(\rho) = ML^{-3}$$

$$ML^{-1}T^{-2} = A(LT^{-1})^\alpha (ML^{-3})^\beta$$

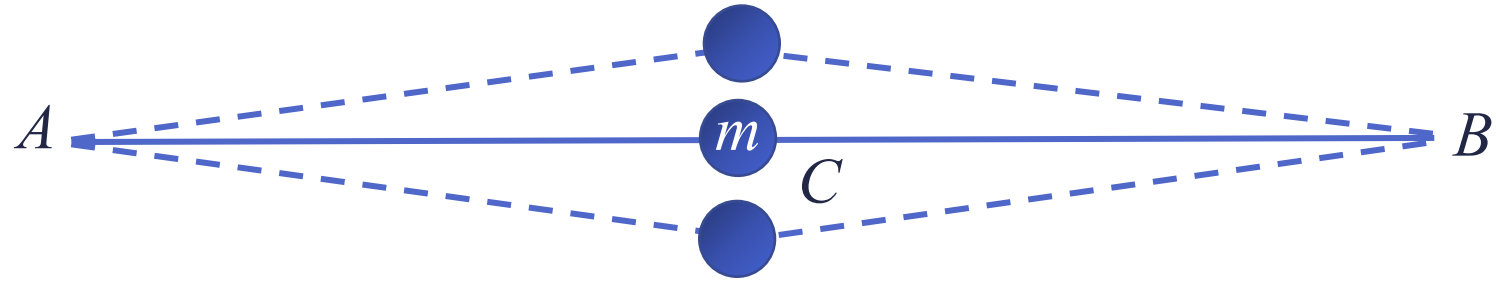
$$ML^{-1}T^{-2} = A \cdot L^{\alpha-3\beta} M^\beta T^{-\alpha} \quad \Rightarrow$$

$$\begin{aligned} \alpha &= 2 \\ \beta &= 1 \\ \alpha - 3\beta &= -1 \end{aligned}$$

$$p = A \cdot v^2 \cdot \rho$$

$$p = \frac{1}{3} \cdot v^2 \cdot \rho$$

# Задача Рэля о колебаниях шарика на струне



$m$  – масса шарика

$F$  – сила натяжения струны

$AC=CB=l$

$\omega = \omega(F, l, m)$  -?

$$\dim(\omega) = T^{-1}$$

$$\dim(l) = L$$

$$\dim(F) = \left[ \frac{m\Delta v}{\Delta t} \right] = MLT^{-2}$$

$$\dim(m) = M$$

$$\omega = A \cdot l^\alpha \cdot (F)^\beta \cdot m^\gamma$$

$$T^{-1} = A \cdot L^\alpha \cdot (MLT^{-2})^\beta \cdot M^\gamma$$

$$T^{-1} = A \cdot L^{\alpha+\beta} \cdot T^{-2\beta} \cdot M^{\beta+\gamma}$$

$$\alpha + \beta = 0; \quad -2\beta = -1; \quad \beta + \gamma = 0 \quad \Rightarrow$$

$$\alpha = -\frac{1}{2}; \quad \beta = \frac{1}{2}; \quad \gamma = -1/2 \quad \Rightarrow$$

$$\omega \sim \sqrt{\frac{F}{ml}}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{2F}{ml}}$$

**СПАСИБО!**

$$S = \frac{(v - v_0)}{2a}$$

$$\Delta U = A + Q$$

$$F = \frac{q_1 q_2}{R^2}$$

$$Q = \lambda m$$

$$X = X_{\max} \cdot \cos \omega t$$

$$N = N_0 \cdot 2^{-t/T}$$

$$A = FS \cos \alpha$$

$$P = \frac{F}{S}$$

$$\Delta d = \frac{(2k+1)\lambda}{2}$$

$$\phi = \frac{P}{P_0 \cdot 100\%}$$

$$Ft = \Delta p$$

$$F = mg$$

$$v_2 = \frac{(v_1 + v)}{1 + v_1 v/c^2}$$

$$t = \frac{t_1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

$$\lambda = vT$$

$$T = 2\pi \sqrt{LC}$$

$$P = IU$$

**СПАСИБО!**

$$Z = \sqrt{(X_C - X_L)^2 + R^2}$$

$$E = \frac{mv^2}{2}$$

$$\eta = \frac{(Q_1 - Q_2)}{Q_1}$$

$$E = 2\pi k \sigma$$

$$F = \rho g V$$

$$Q = C(T_2 - T_1)$$

$$P = m(g+a)$$

$$\frac{v}{T} = \text{const}$$

$$\rho = \frac{m}{V}$$

$$p = mc = \frac{h}{\lambda} = \frac{E}{c}$$

$$T = \frac{2\pi\sqrt{l}}{g}$$

$$F = \frac{kq_1 q_2}{r^2}$$

$$F_{\text{упр}} = -kx$$