

Международная система единиц СИ и ее реализация в эталонах: современное состояние и ближайшие перспективы

С. Г. Каршенбойм

Институт метрологии им. Д. И. Менделеева (ВНИИМ)

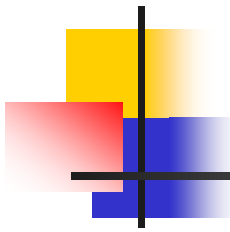
Max-Planck-Institut für Quantenoptik (Garching)



MAX-PLANCK-INSTITUTE
OF QUANTUM OPTICS
GARCHING



Зачем нужна система единиц?



- Система единиц как часть терминологии.
- Это просто удобно.
- Все измерения – относительные, но если у нас есть 100 масс, то можно написать 50 тысяч отношений.
- Единицы нужны для того, чтобы измерять.
- При низкой точности – это только терминология.
- При высоких точностях система единиц становится внешним фасадом системы эталонов.

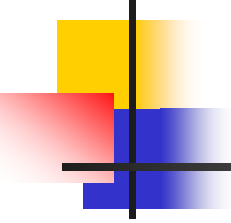
Зачем нужна система единиц?

- Система единиц как часть терминологии.
- Это просто удобно.

Требования к системе единиц определяются требованиями к системе эталонов и возможностями ее реализации.

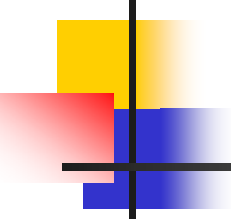
Система единиц из терминологической игрушки превращается в передний край науки.

- Единицы нужны для того, чтобы измерять.
- При низкой точности – это только терминология.
- При высоких точностях система единиц становится внешним фасадом системы эталонов.



Кому нужна система единиц?

- Конечно, физикам нужна общая терминология, но мы не привыкли заботиться о терминологии как-таковой.
- Нам достаточно хорошо понимать друг друга.
- Когда дело доходит до практических приложений – все иначе.
- По закону, когда вы покупаете яблоки, лампочки или батарейки – их характеристики должны быть указаны в СИ.



Кому нужна система единиц?

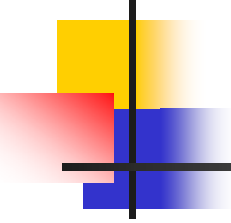
- Конечно, физикам нужна общая терминология, но мы не привыкли

Узаконенная и эффективная система единиц нужна производителям, продавцам и потребителям.

Иными словами – **нефизикам!**

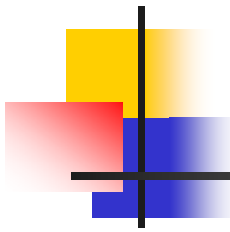
Именно из этих соображений и решается нужна ли кандела и моль и т.д.

- Когда дело доходит до практических приложений – все иначе.
- По закону, когда вы покупаете яблоки, лампочки или батарейки – их характеристики должны быть указаны в СИ.



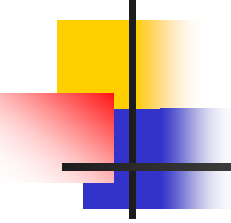
Содержание

- Основные единицы и их реализация на практике
 - секунда
 - метр
 - килограмм
 - ампер
 - кельвин
 - моль
- Почему они именно такие?
- Проблемы и перспективы
- Скрытая часть айсберга
- Естественные единицы



А зачем вообще нужны единицы?

- Единицы = единицы измерений!
- Считать можно в любых единицах, но цель вычислений – это всё-таки число, которое можно измерить!
- Нам нужны единицы для того, чтобы держать в порядке наши приборы для измерений точных и разных.
- Нам нужны и часы, и весы, и линейки, и вольтметры.



Артефакты и метрическая система

Изначально метрическая система имела дело с **естественными** единицами:

- тогдашний километр был $1/10000$ квадранта;
- тогдашний килограмм был массой литра воды.

Однако, это было непрактично.

Почти сразу создали артефакты: как практические промежуточные единицы.

Позднее было обнаружено, что артефакты не согласны с естественными определениями.

Артефакты и метрическая система

Изначально метрическая система имела дело с **естественными** единицами:

- тогдашний километр был $1/10000$ квадранта;
- тогдашний килограмм был массой литра воды.

Однако, это было непрактично.

Почти сразу создали артефакты: как практические промежуточные единицы.

Позднее было обнаружено, что артефакты не согласны с естественными определениями.

И артефакты стали единицами.

Артефакты и метрическая система

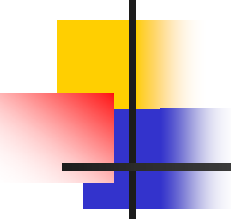
и Это стало началом цепочки многочисленных превращений основных метрических единиц.

- Нет никакой вечной системы СИ:
всё течёт – всё изменяется.
- Не меняются лишь названия единиц.

был массой литра
воды.

, это было
активно.





Фундаментальные константы: естественные единицы

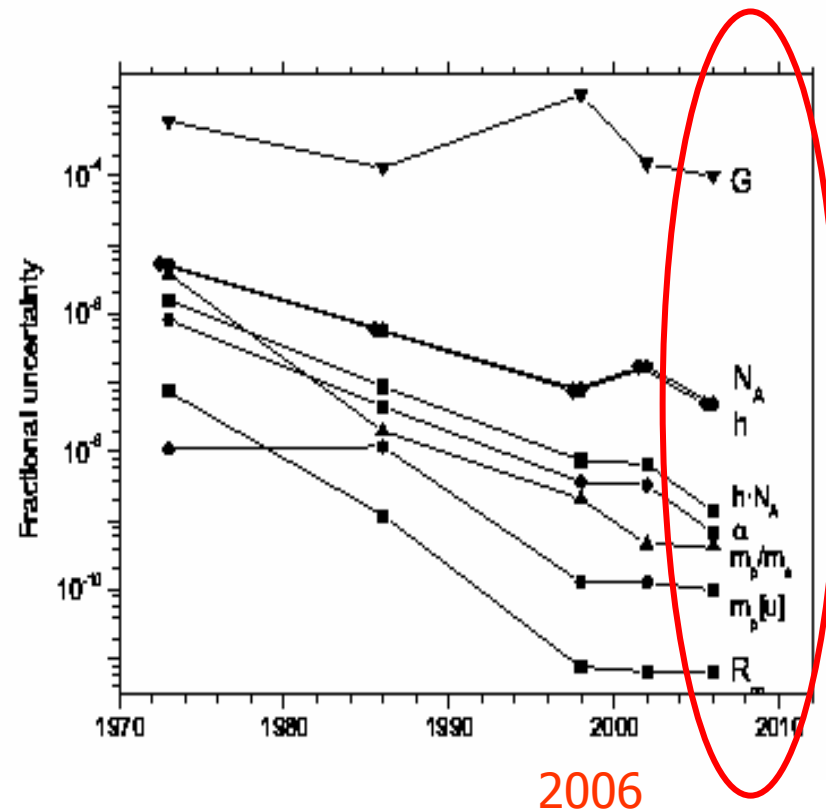
- Размерные константы — естественные единицы измерения:
 - массы частиц
 - частоты переходов
 - длины волн и т.д.
- Числовые значения — отчасти случайны.
- Отражают
 - привычки (фут → метр)
 - изначальное непонимание (температура и энергия)

Прогресс в уточнении значений ФФК

Наиболее важны в качестве естественных единиц

- массы частиц;
- постоянная Авогадро N_A ;
- постоянная Планка h ;
- гравитационная постоянная G ,
- заряд электрона e .

Прогресс в уточнении значений констант



Международная система единиц СИ

Килограмм, кг (kg):

Килограмм – это
единица массы,
равная массе
международного
прототипа
килограмма.



Международная система единиц СИ

Секунда, с (s):

Секунда – это интервал времени, равный 9 192 631 770 периодам излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133.



Международная система единиц СИ

Метр, м (m):

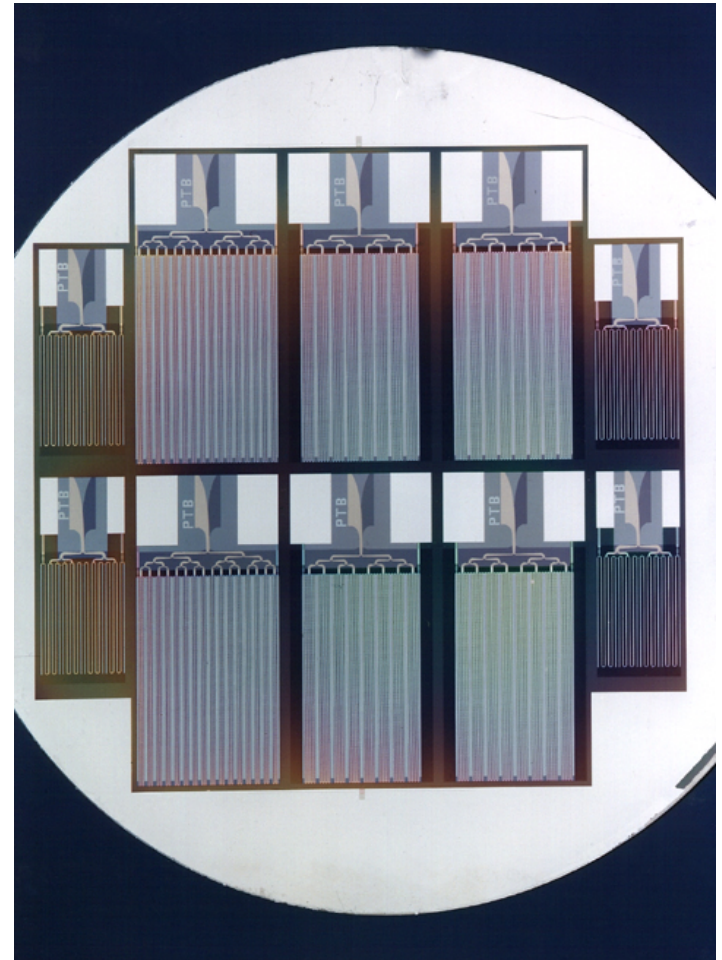
Метр – это длина
пути, проходимого
светом в вакууме
за промежуток
времени
 $1/299\,792\,458$ доли
секунды.



Международная система единиц СИ

Ампер, А (A):

Ампер – это сила постоянного тока, который, при прохождении по двум прямолинейным параллельным проводникам бесконечной длины и пренебрежимо малого кругового сечения, расположенными в вакууме на расстоянии 1 метр один от другого, вызывает силу, равную 2×10^{-7} ньютон, на каждом участке проводника длиной в 1 метр.

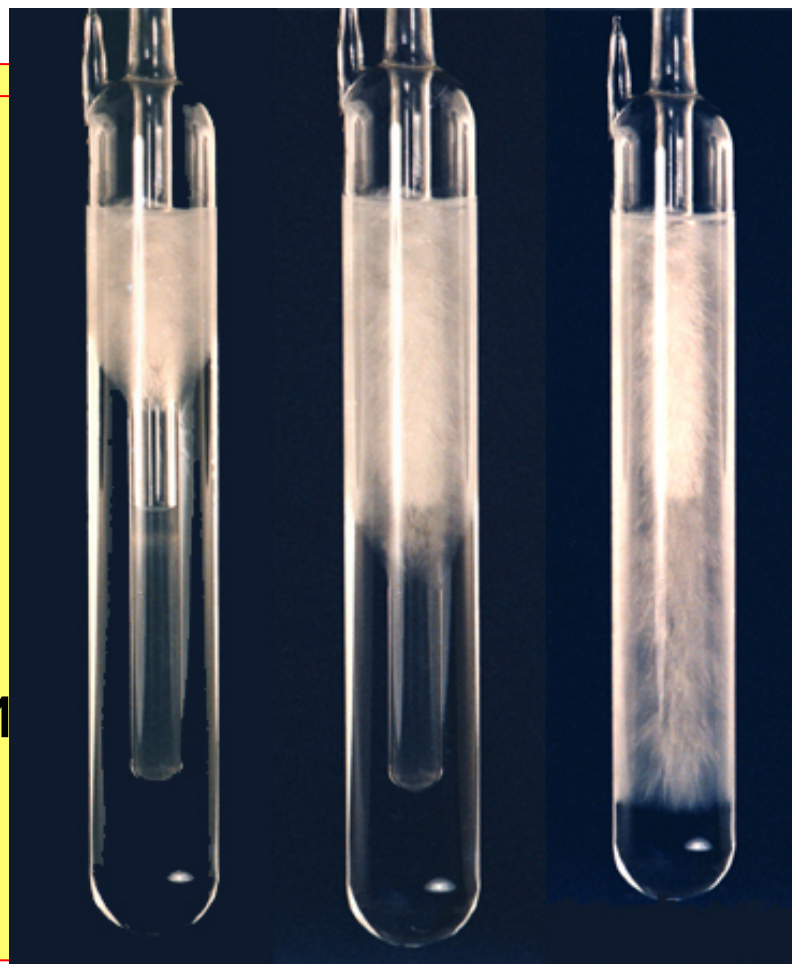


Международная система единиц СИ

Кельвин, К (K):

Кельвин — это единица термодинамической температуры, равная $1/273,16$ части термодинамической температуры тройной точки воды.

каждом участке проводника
длиной в 1 метр.

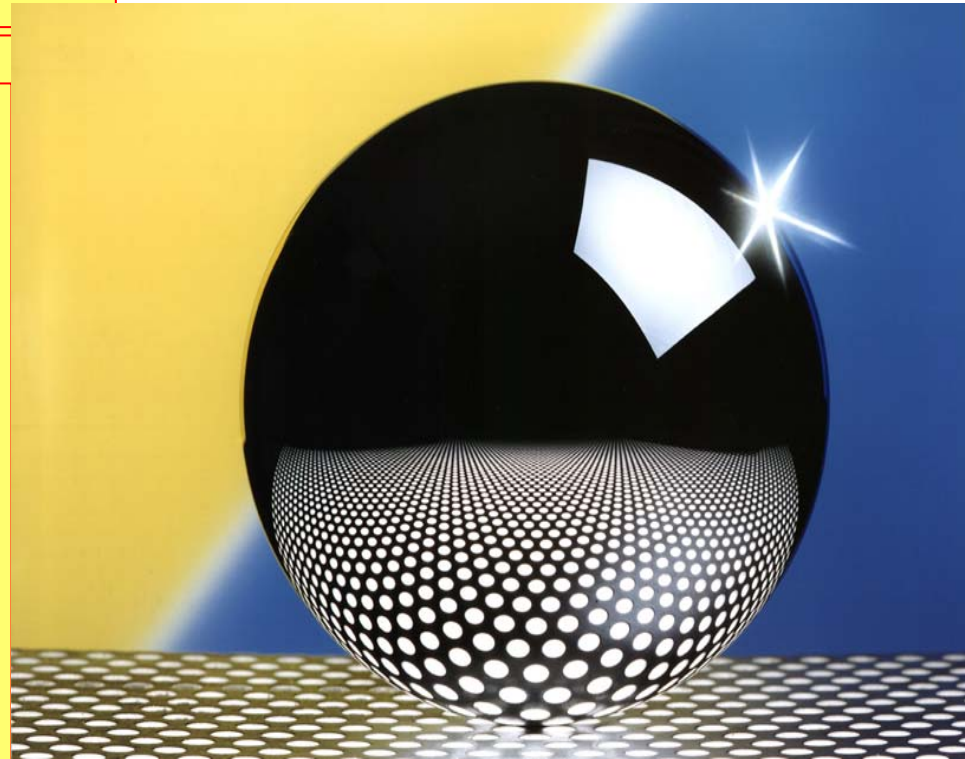


Международная система единиц СИ

Моль, моль (mol):

Моль — это количество вещества системы, которая содержит столько же частиц, сколько атомов содержится в 0,012 килограммах углерода-12.

длиной в 1 метр.



Основные единицы физических величин в СИ: секунда и метр

Частота:

Радиочастотные
источники.

Измерения: удобны
в сравнении.

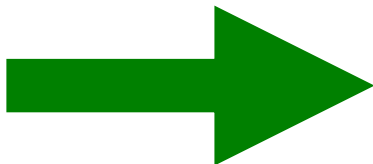
Переход 5-6 порядков.

Длина:

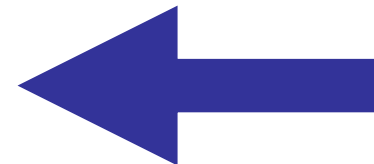
оптические источники.

Измерения длины:
интерферометры.

Cs
HFS



c



Kr

Основные единицы физических величин в СИ: секунда и метр

Частота:

Радиочастотные
источники.

Измерения: удобны
в сравнении.

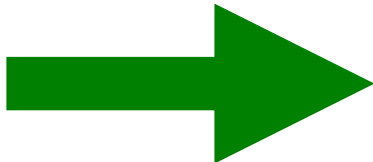
Переход 5-6 порядков.

Длина:

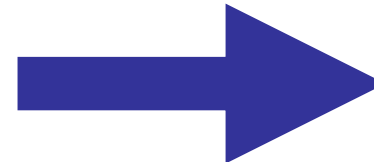
оптические источники.

Измерения длины:
интерферометры.

Cs
HFS



c



....

Основные единицы физических величин в СИ: секунда и метр

Частота:

~~Радиочастотные
источники.~~

~~Измерения: удобны
в сравнении.~~

Переход 5-6 порядков.

Длина:

оптические источники.

Измерения длины:
интерферометры.

Optics

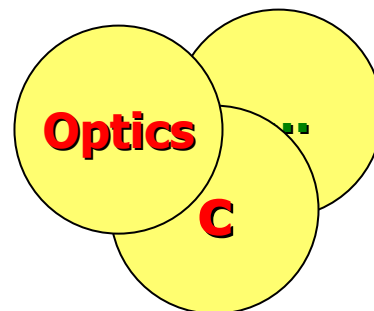
ν

c

λ

....

Основные единицы физических величин в СИ: секунда и метр



Основные единицы физических величин в СИ: секунда и метр

Частота:

Радиочастотные
источники.

Измерения: удобны
в сравнении.

Переход 5

Длина:

НИКИ.

Ы:
Ы.

Оптическая гребёнка:
Нобелевская премия 2005

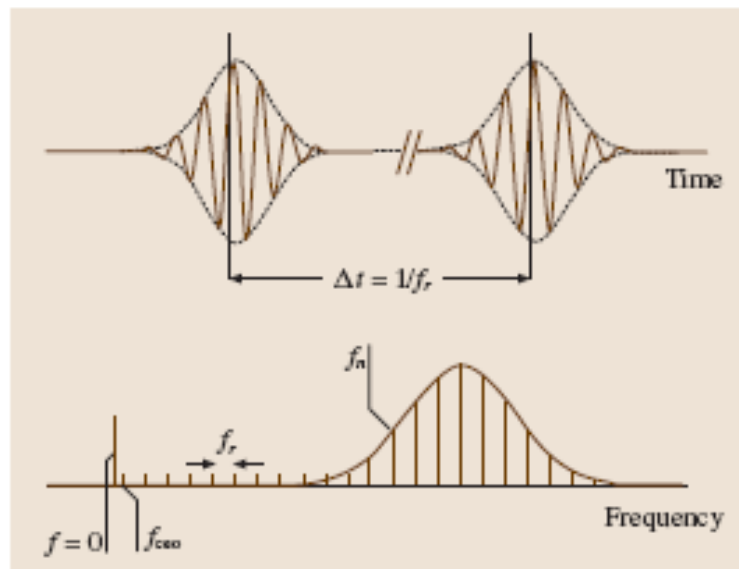


Fig. 30.3 Frequency comb generated from femtosecond laser pulses

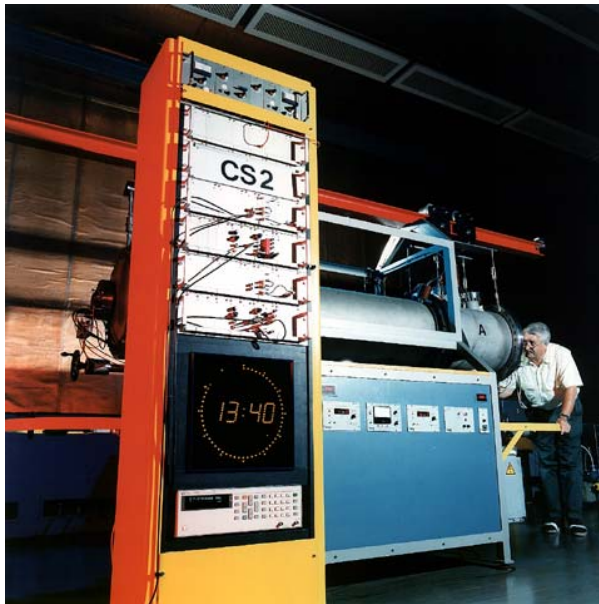
Основные единицы физических величин в СИ: секунда

- Современные часы
- Оптические часы
- Частота – в основе всех измерений



Основные единицы физических величин в СИ: секунда

- Современные часы



Метод Рамси:
Нобелевская премия 1989

Лазерное охлаждение:
Нобелевская премия 1997

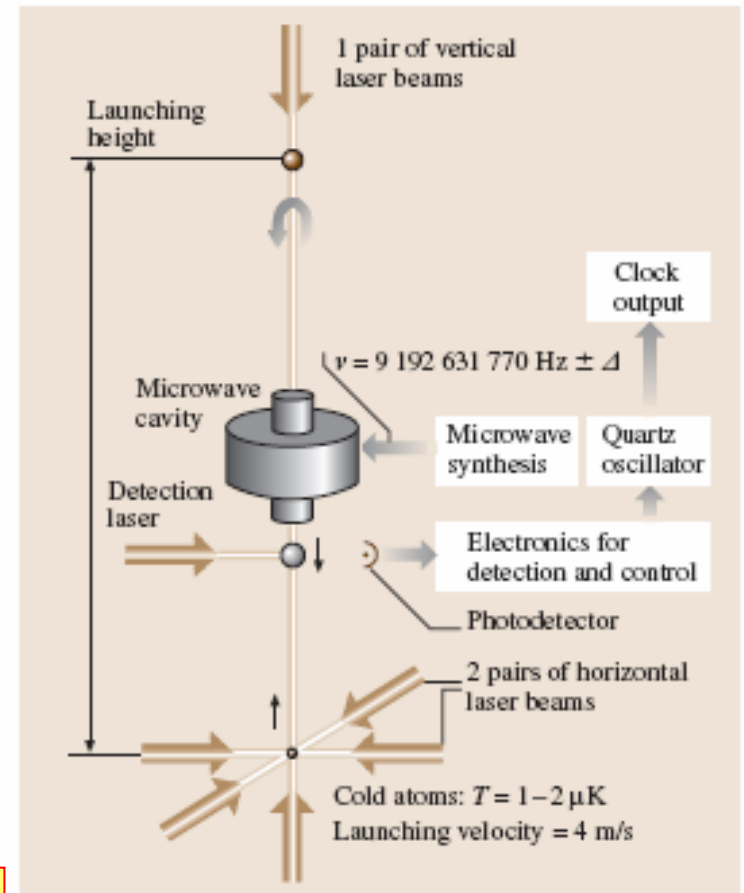


Fig. 30.1 Schematic of an atomic fountain clock

Основные единицы физических величин в СИ: секунда

- Современные часы
- Оптические часы
- Частота – в основе всех измерений

Ловушки для ионов:
Нобелевская премия 1989

Лазерное охлаждение:
Нобелевская премия 1997

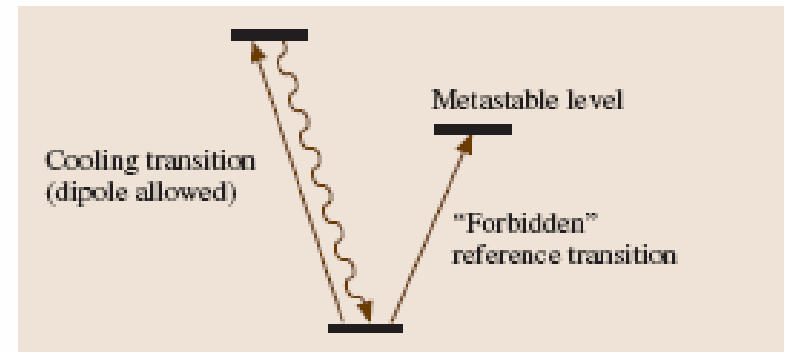


Fig. 30.2 Double resonance scheme applied in single-ion-trap frequency standards

Совсем новые оптические часы: квантовая логика

NIST: quantum logics & direct comparison between two optical clocks

Frequency Ratio of Al^+ and Hg^+
Single-Ion Optical Clocks; Metrology
at the 17th Decimal Place

T. Rosenband,* D. B. Hume, P. O. Schmidt,† C. W. Chou, A. Brusch, L. Lorini,‡ W. H. Oskay,§
R. E. Drullinger, T. M. Fortier, J. E. Stalnaker,|| S. A. Diddams, W. C. Swann,
N. R. Newbury, W. M. Itano, D. J. Wineland, J. C. Bergquist

PRL 98, 220801 (2007)

PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
1 JUNE 2007

Observation of the $1S_0 \rightarrow 3P_0$ Clock Transition in $^{27}\text{Al}^+$

T. Rosenband,^{1,*} P. O. Schmidt,^{1,†} D. B. Hume,¹ W. M. Itano,¹ T. M. Fortier,² J. E. Stalnaker,¹ K. Kim,^{1,‡} S. A. Diddams,¹
J. C. J. Koelemeij,^{1,§} J. C. Bergquist,^{1,||} and D. J. Wineland¹

¹National Institute of Standards and Technology, 325 Broadway, Boulder, Colorado 80305, USA
²P. 23 Physics Division, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico 87545, USA

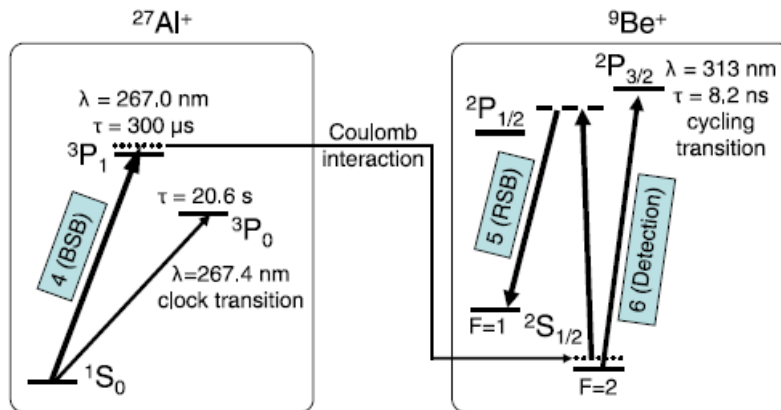


FIG. 1 (color online). Transfer of the $^{27}\text{Al}^+$ clock state to $^9\text{Be}^+$ for detection. Quantum state transfer proceeds according to numbers 4, 5, and 6 in shaded boxes, which denote corresponding steps in the text. Dotted lines denote the first vibrational excitation of the in-phase axial mode. The dashed line represents the virtual level of the $^9\text{Be}^+$ stimulated Raman transition.

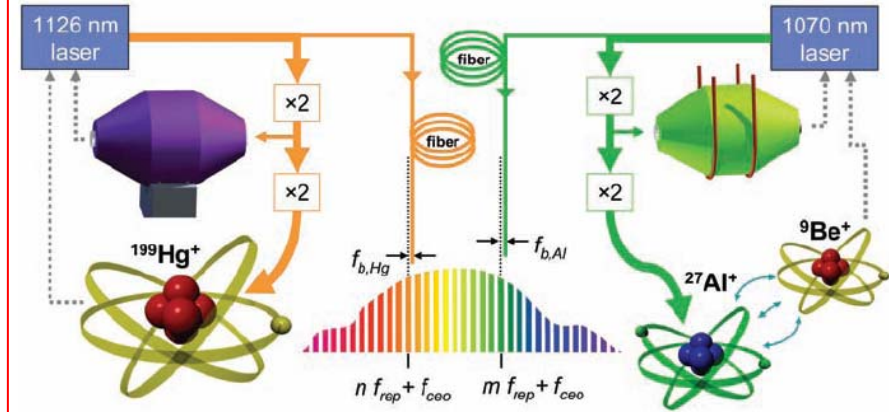


Fig. 1. Frequency ratio measurement system for the comparison of $^{199}\text{Hg}^+$ and $^{27}\text{Al}^+$ optical clock frequencies. (Left) The fourth harmonic of a 1126-nm wavelength infrared (IR) laser drives atomic-state transitions in a $^{199}\text{Hg}^+$ ion (40-ms probe time, 70% duty cycle). The transition rate yields an error signal to keep the laser frequency locked to the atomic resonance. (Right) A 1070-nm wavelength IR laser performs the same function for $^{27}\text{Al}^+$ (100-ms probe time, 45% duty cycle), which is coupled to a nearby $^9\text{Be}^+$ ion by their mutual Coulomb repulsion for the purposes of sympathetic cooling and internal state detection. Both lasers are prestabilized to ultralow-expansion glass Fabry-Perot cavities (purple and green ellipsoids), thereby narrowing their linewidth to about 1 Hz (4). Boxes marked “ $\times 2$ ” are second-harmonic generation stages to convert IR light first to visible and then to ultraviolet wavelengths. The two laser frequencies are compared by means of a femtosecond comb (12), to which both clock laser systems are linked by 300-m lengths of actively phase-stabilized optical fiber. The quantities $f_{b,\text{Hg}}$ (beat note of the mercury clock laser with spectral component n of femtosecond comb), $f_{b,\text{Al}}$ (beat note of the aluminum clock laser with spectral component m of the femtosecond comb), f_{ceo} (femtosecond comb carrier-envelope offset), and f_{rep} (femtosecond comb repetition rate) comprise the frequency ratio measurement (12).

Совсем новые оптические часы: квантовая логика

1D optical lattice

An optical lattice clock

Masao Takamoto¹, Feng-Lei Hong³, Ryoichi Higashi¹ & Hidetoshi Katori^{1,2}

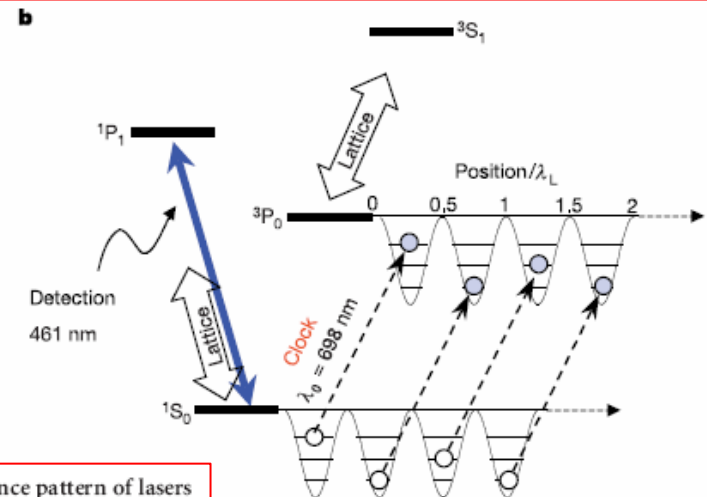
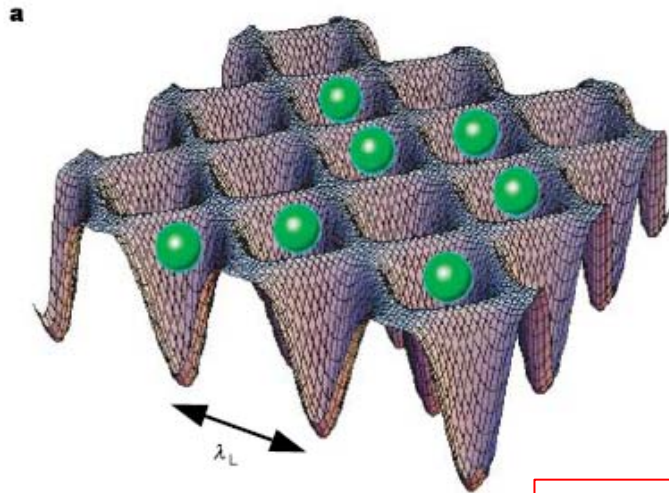


Figure 1 | Optical lattice clock. **a**, The spatial interference pattern of lasers creates a lattice potential that confines atoms in a region much smaller than the optical wavelength, λ_L . **b**, Energy levels for Sr. The $1S_0$ and $3P_0$ states are coupled to the upper respective spin states by an off-resonant laser to produce an optical lattice with equal energy shifts in the clock transition at $\lambda_0 = 698$ nm. Atoms are excited on the $|1S_0\rangle \otimes |n\rangle \rightarrow |3P_0\rangle \otimes |n\rangle$ electronic-vibrational transitions, where n denotes the vibrational states of atoms in the lattice potential. The clock transition is then monitored on the $1S_0 - 1P_1$ cyclic transition with nearly unit quantum efficiency.

PRL 100, 140801 (2008)

PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
11 APRIL 2008

New Limits on Coupling of Fundamental Constants to Gravity Using ^{87}Sr Optical Lattice Clocks

S. Blatt,^{*} A. D. Ludlow, G. K. Campbell, J. W. Thomsen,[†] T. Zelevinsky,[‡] M. M. Boyd, and J. Ye
*JILA, National Institute of Standards and Technology and University of Colorado,
Department of Physics, University of Colorado, Boulder, Colorado, 80309-0440, USA*

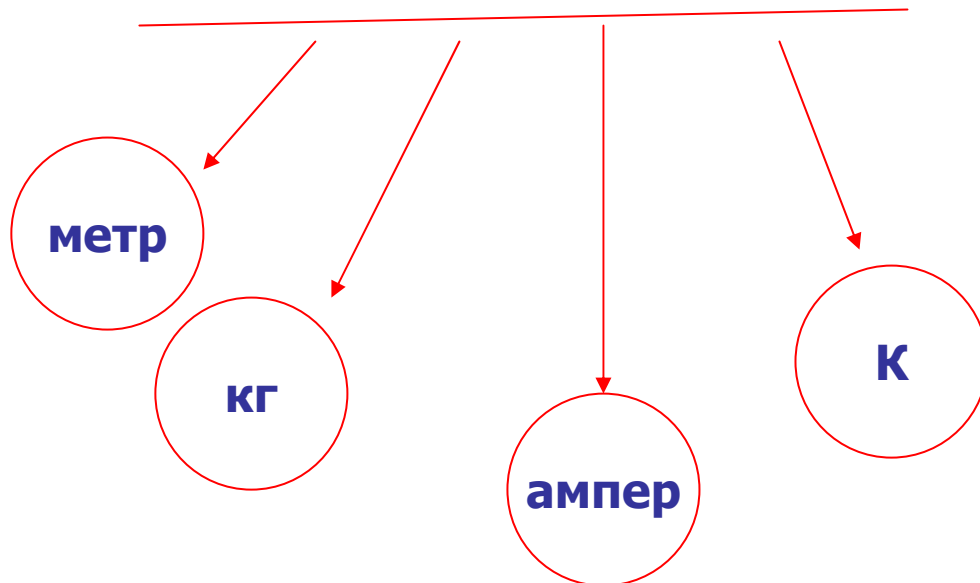
X. Baillard, M. Fouché,[§] R. Le Targat, A. Brusch,^{||} and P. Lemonde
LNE-SYRTE, Observatoire de Paris, 61, Avenue de l'Observatoire, 75014, Paris, France

M. Takamoto, F.-L. Hong,¹ and H. Katori
Department of Applied Physics, Graduate School of Engineering, The University of Tokyo, Bunkyo-ku, 113-8656 Tokyo, Japan

V. V. Flambaum

Основные единицы физических величин в СИ: секунда

- Современные часы
- Оптические часы
- Частота – в основе всех измерений



- С точки зрения физики: измерения частоты – передний край науки.
- С точки зрения СИ: победитель еще не определился. Затишье перед бурей.

Основные единицы физических величин в СИ: метр

- Определение: роль фундаментальных констант
- Основная или производная величина?
- Погрешность измерения скорости света



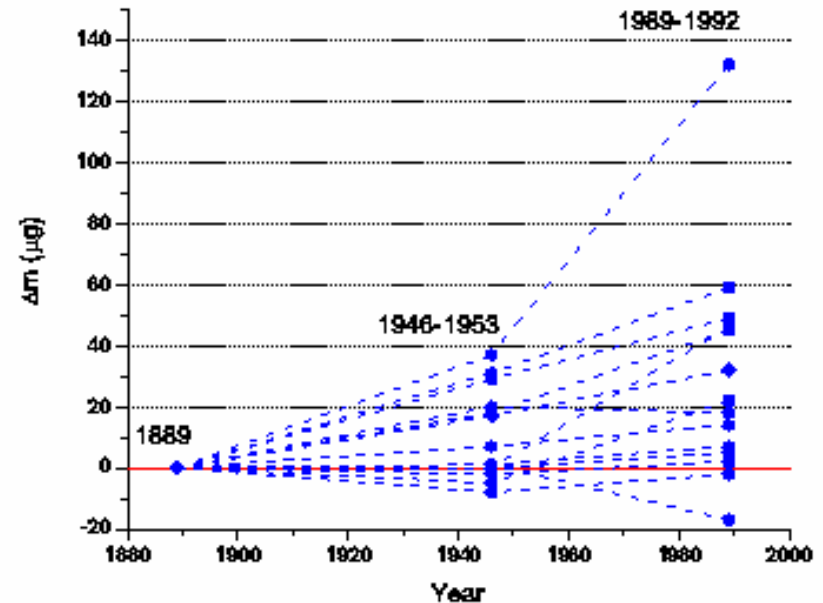
Основные единицы физических величин в СИ: килограмм

- Инерционная и гравитационная масса
- Весы
- Артефакты
- Проблемы искусственных эталонов



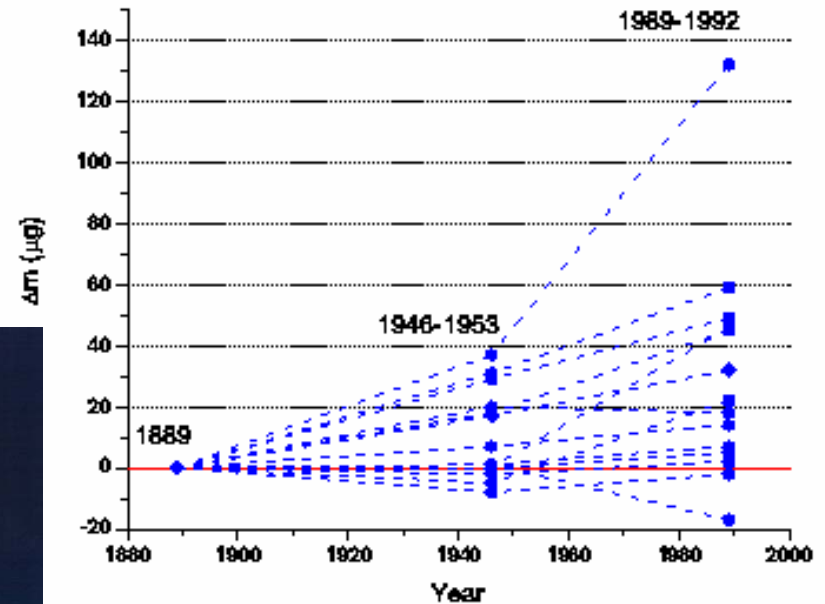
Основные единицы физических величин в СИ: килограмм

- Инерционная и гравитационная масса
- Весы
- Артефакты
- Проблемы искусственных эталонов



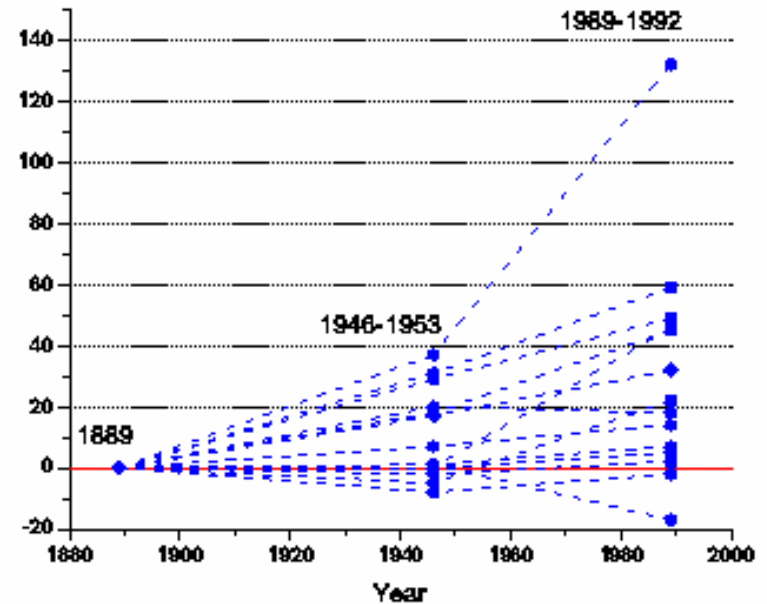
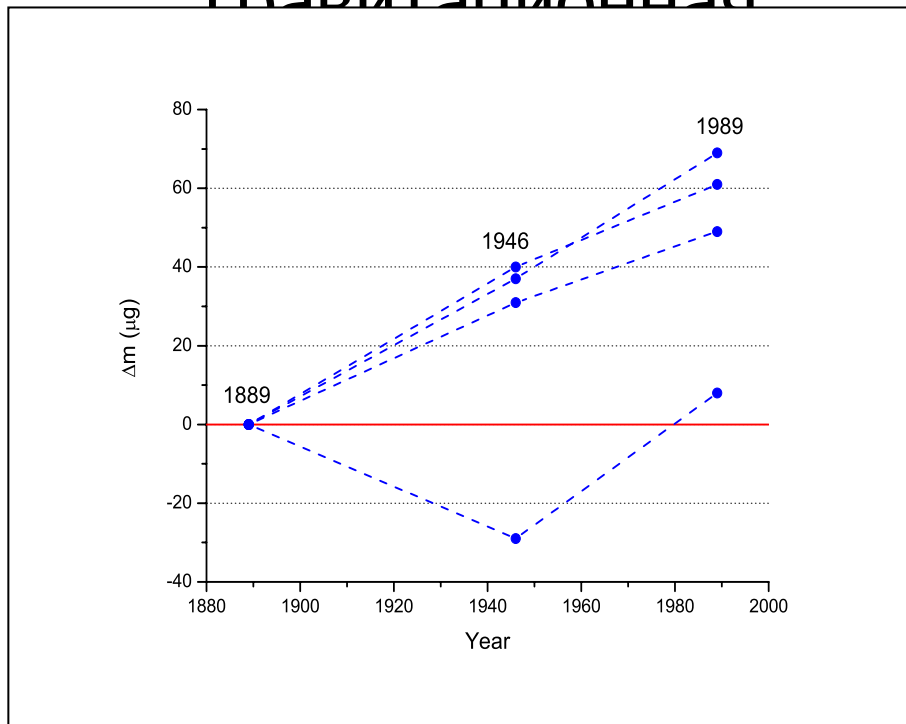
Основные единицы физических величин в СИ: килограмм

- Инерционная и гравитационная масса



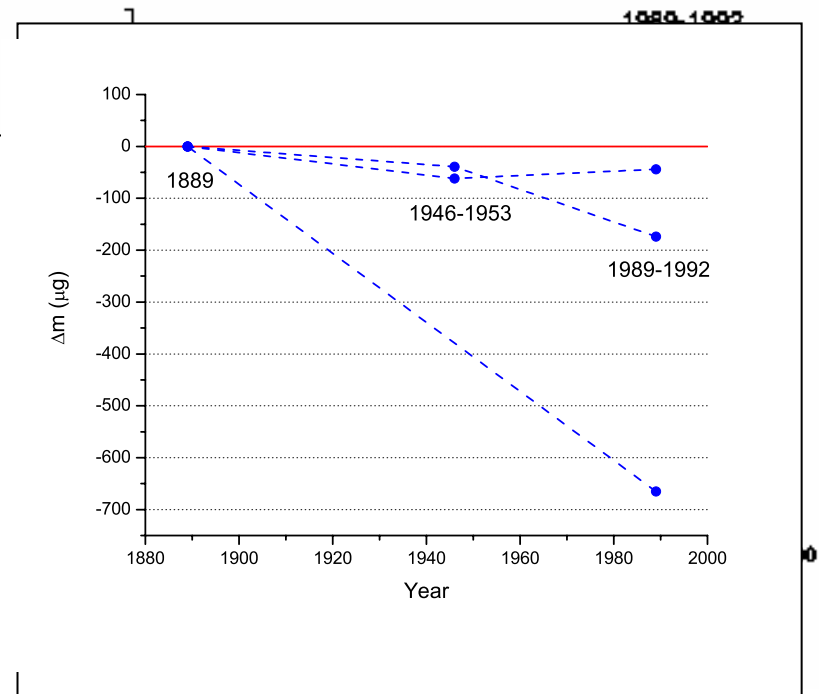
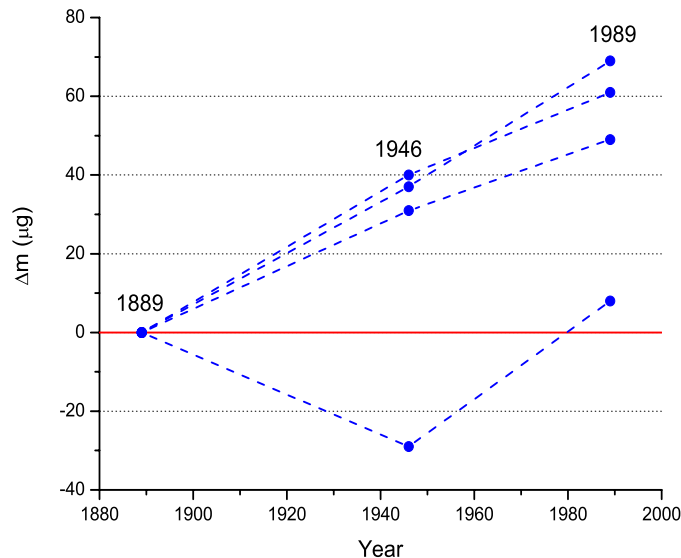
Основные единицы физических величин в СИ: килограмм

■ Инерционная и гравитационная



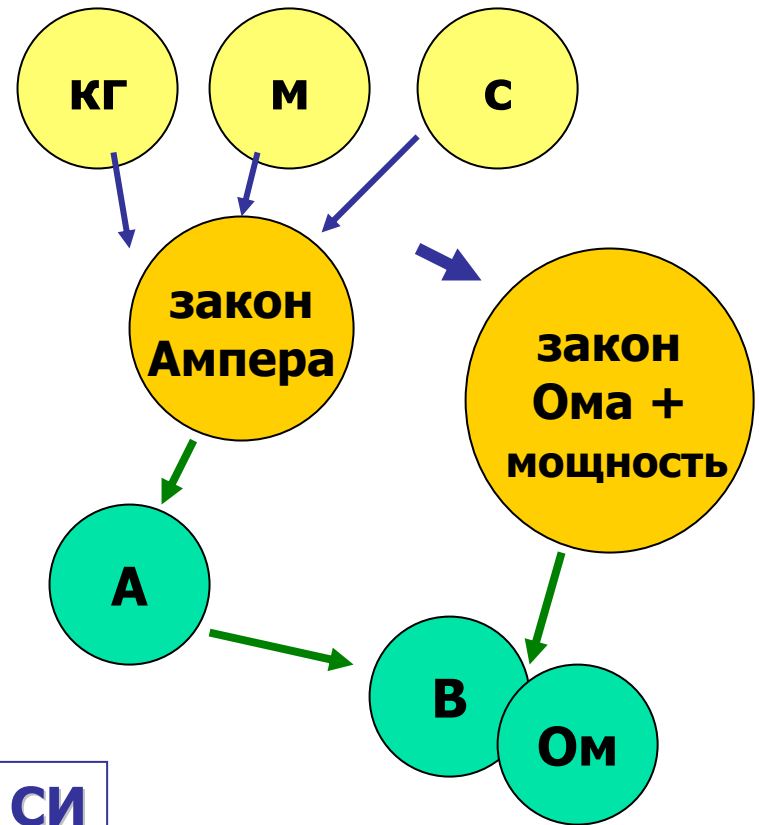
Основные единицы физических величин в СИ: килограмм

■ Инерционная и гравитационная



Основные единицы физических величин в СИ: ампер

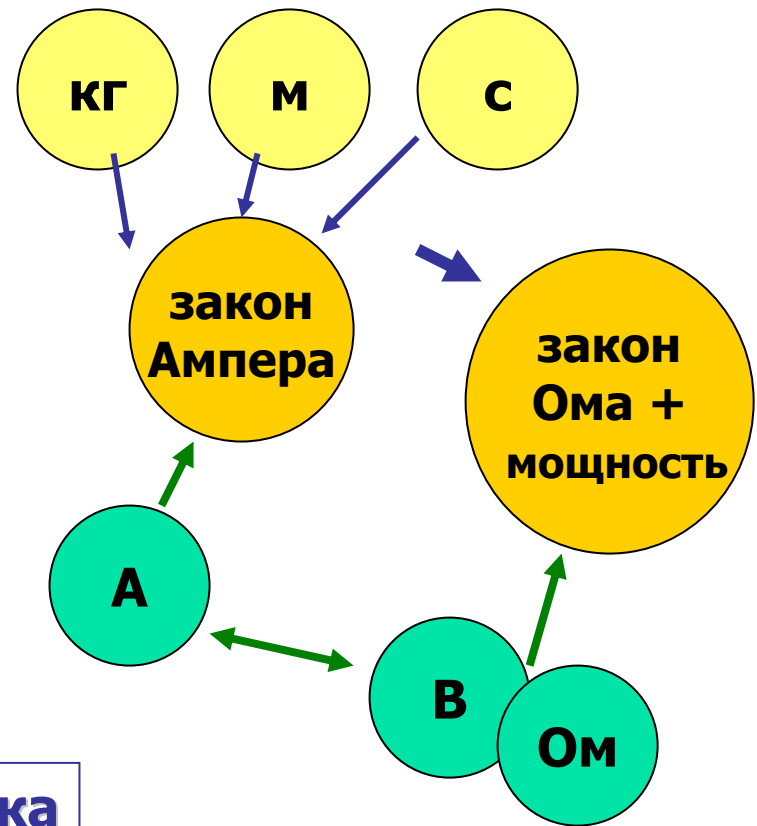
- СГС и СИ
- Механические и электрические измерения
- Электротехника
- Практические единицы
- Квантовые единицы



Логика СИ

Основные единицы физических величин в СИ: ампер

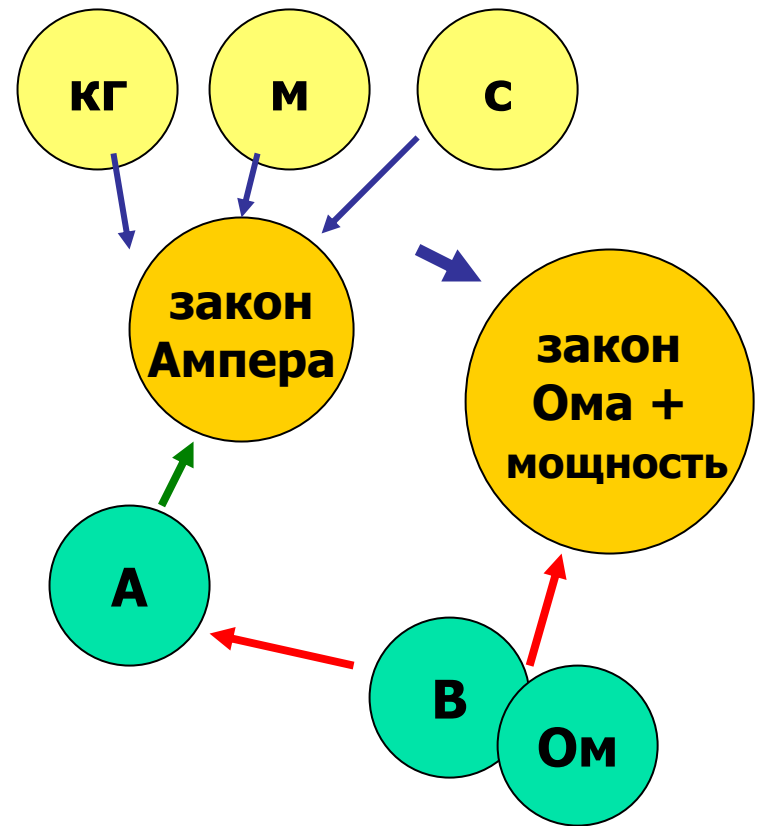
- СГС и СИ
- Механические и электрические измерения
- Электротехника
- Практические единицы
- Квантовые единицы



Практика

Основные единицы физических величин в СИ: ампер

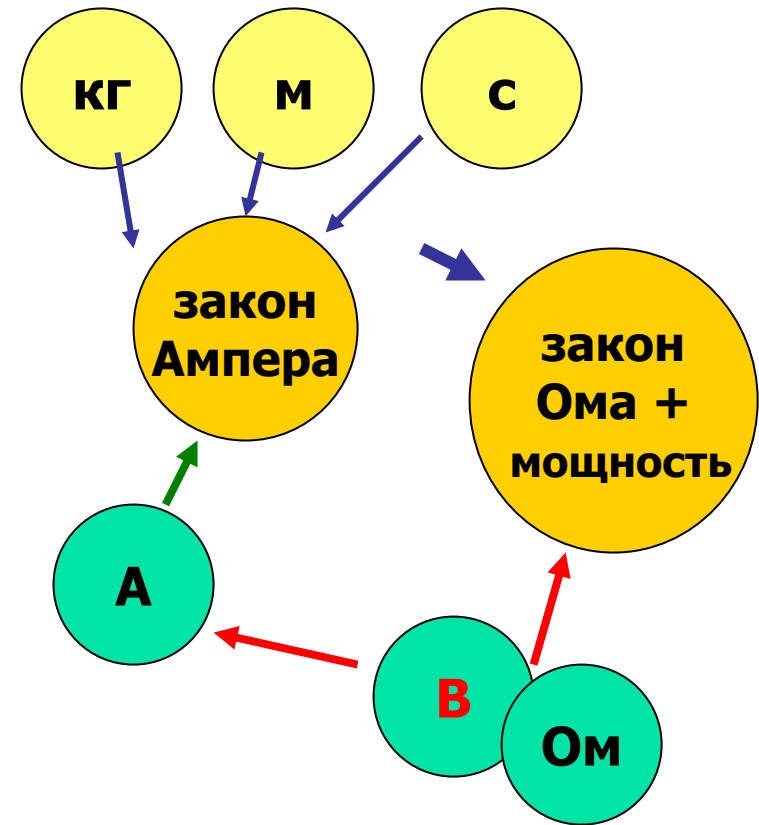
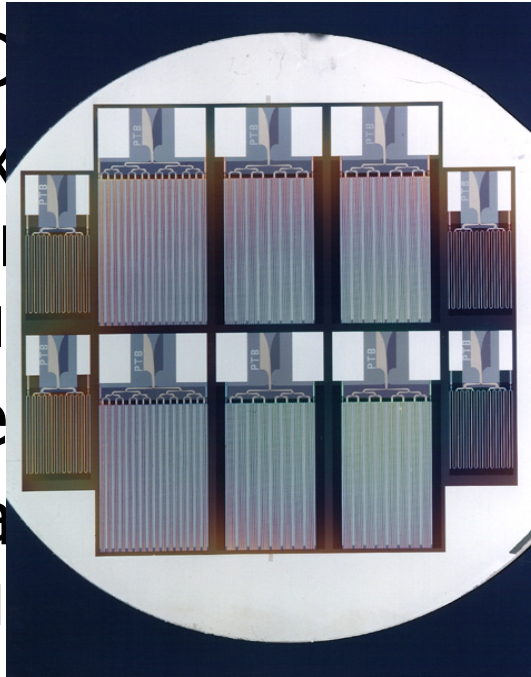
- СГС и СИ
- Механические и электрические измерения
- Электротехника
- Практические единицы
- **Квантовые единицы**



Современная практика

Основные единицы физических величин в СИ: ~~ампер~~ вольт

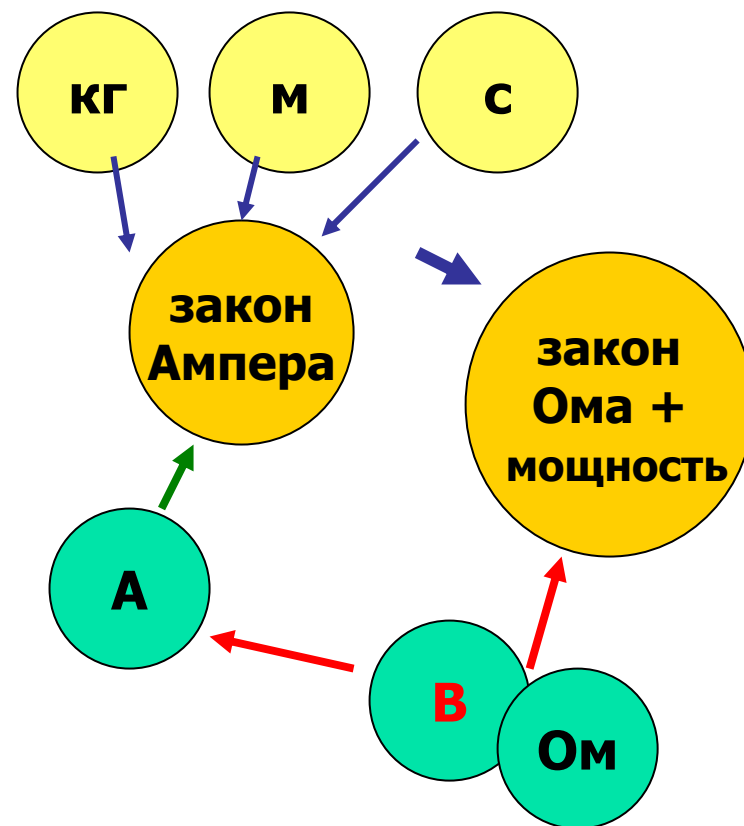
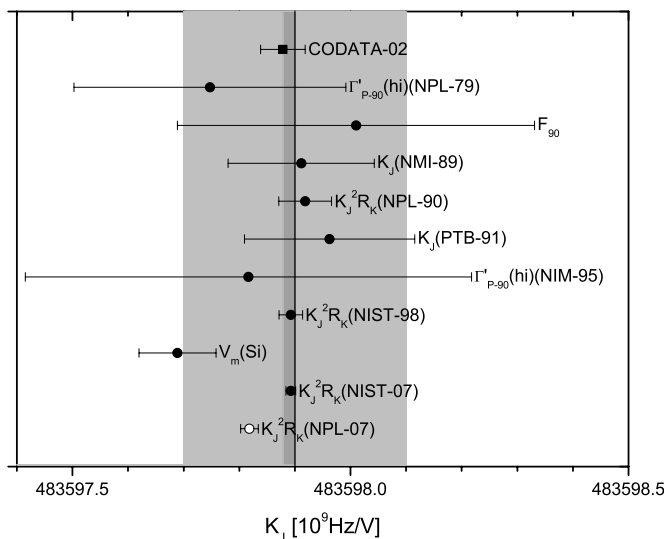
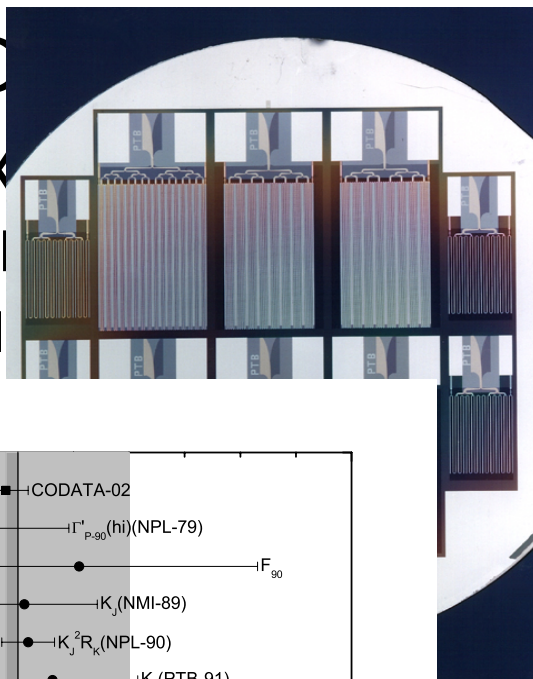
- СГО
- Мех
- эле
- изм
- Эле
- Пра
- еди
- **Квантовые единицы**



Современная практика

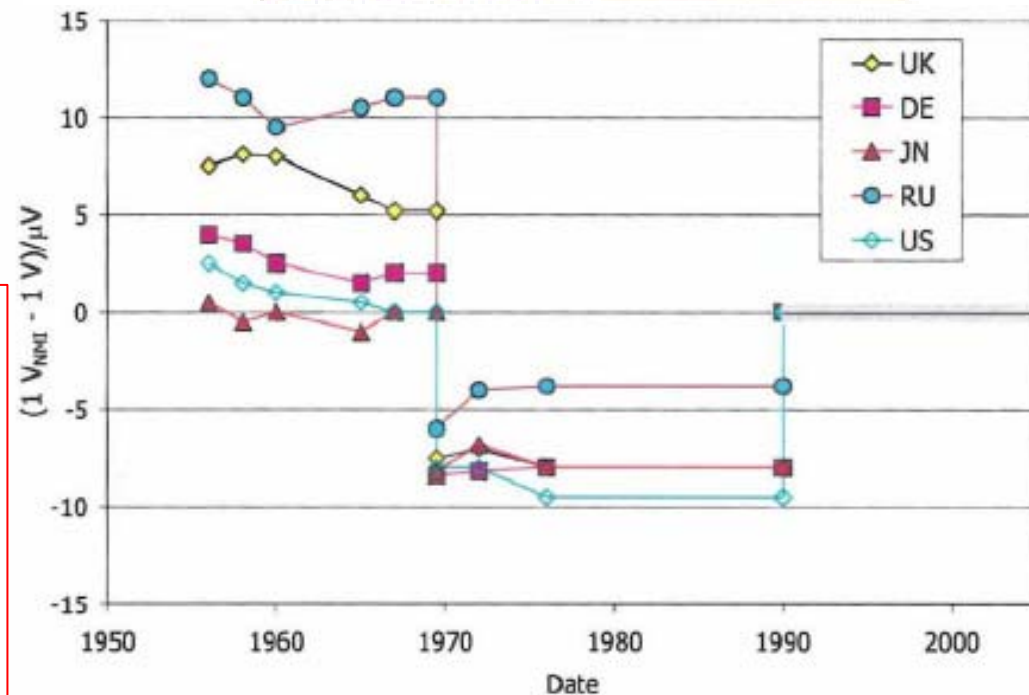
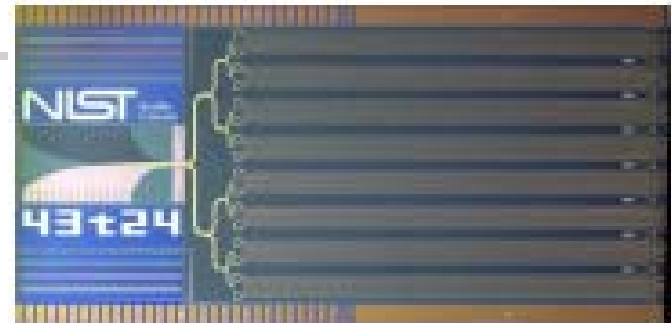
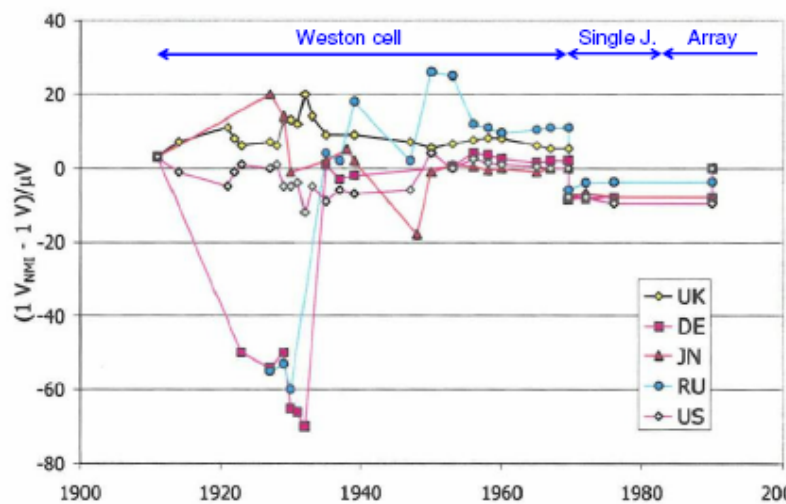
Основные единицы физических величин в СИ: ампер ~~вольт~~

- СГО
- Мех
- эле
- изм



Эффект Джозефсона и эталон вольты

Voltage Unit: Representation



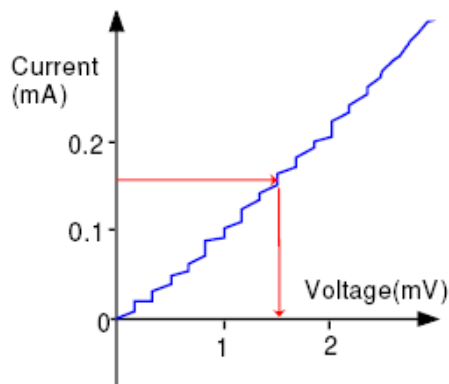
Irradiation with microwave:

- Cooper pairs synchronize with radiation
- Voltage steps appear

$$V_n = n \frac{h}{2e} f$$

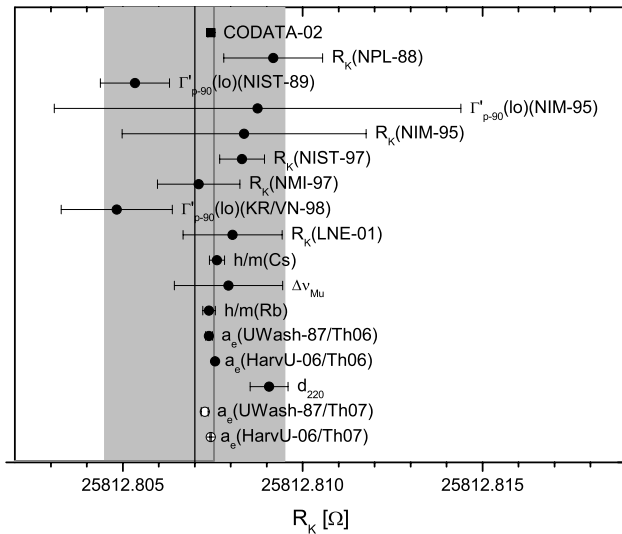
Shapiro step, 1963

$V_1 \sim 145 \mu\text{V}$ @ 70 GHz



Основные единицы физических величин в СИ: ампер ом

- СГС и СИ

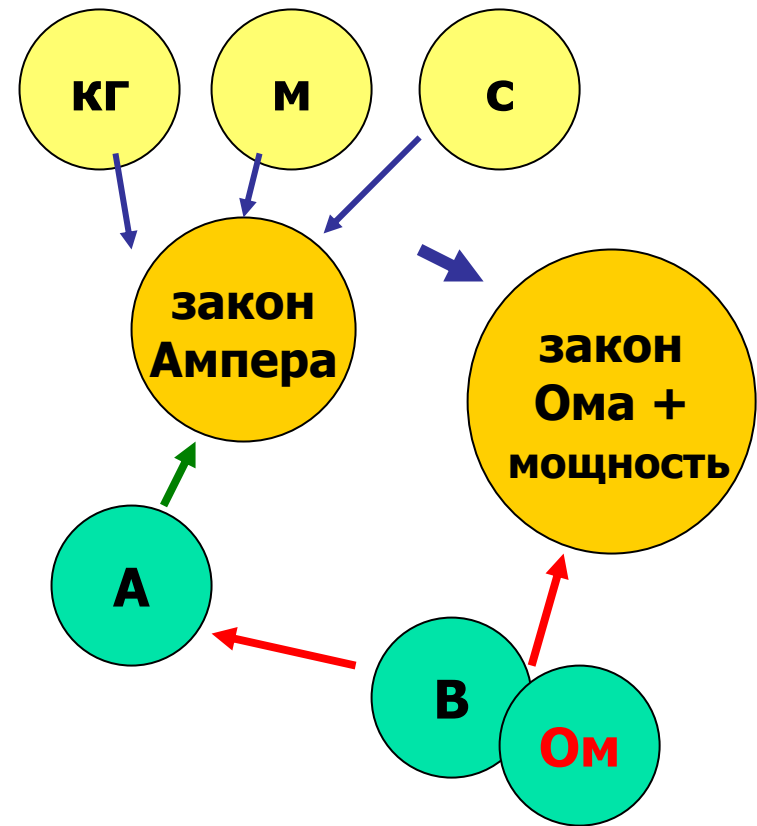


■ КВАНТОВЫЕ
ЕДИНИЦЫ

Квантовый эффект Холла:
Нобелевская премия 1985

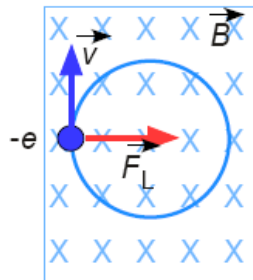
Современная практика

и
э
ка



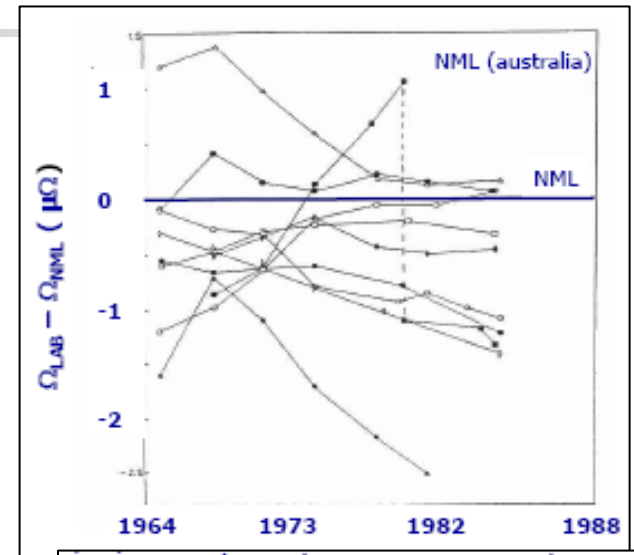
Квантовый и классический эффект Холла и эталон ома

Classical Hall effect
(1879)

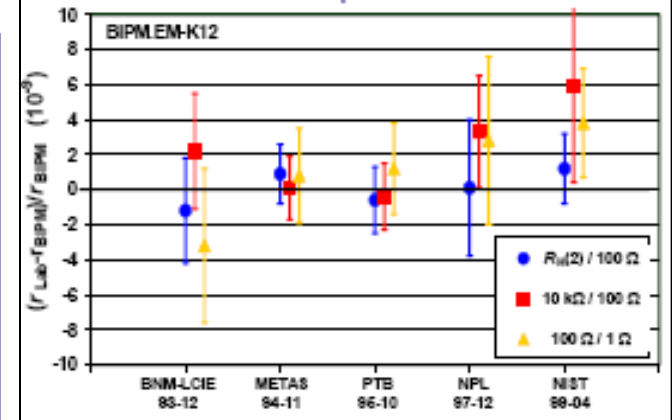


Lorentz Force

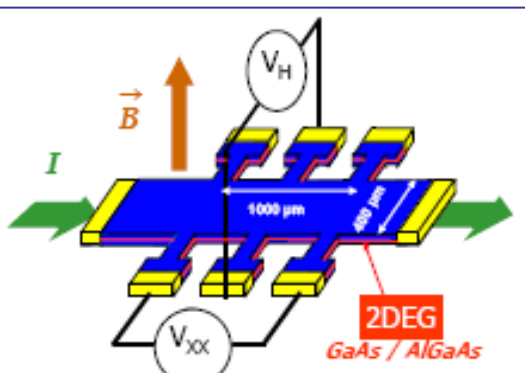
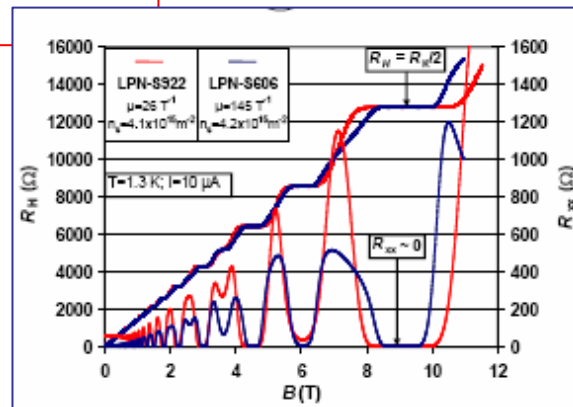
$$\vec{F}_L = q(\vec{v} \times \vec{B})$$

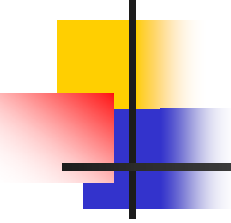


Bilateral comparisons with BIPM



W. Poirier, Les Houches, 2007





Единицы электрических и механических величин в СИ

- Килограмм и ампер
- Электротехника
- Весы
- Мост между ними
- Практические единицы
- Перспективы

Единицы электрических и механических величин в СИ

**Измерение
массы**

Весы

Легко!

Электродинамика

**электрические весы
и т.д.**

Электротехника

**Измерения
напряжений,
сопротивлений, токов**

Легко!

Единицы электрических и механических величин в СИ

Измерение
массы

Весы

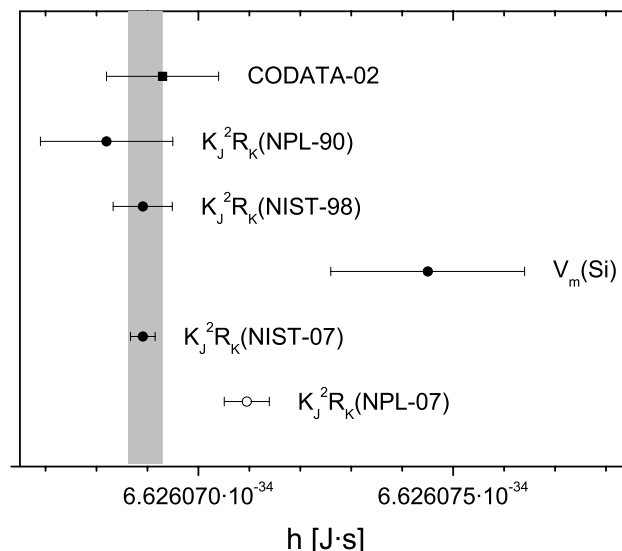
Легко!

Электродинамика
электрические весы

Электротехника

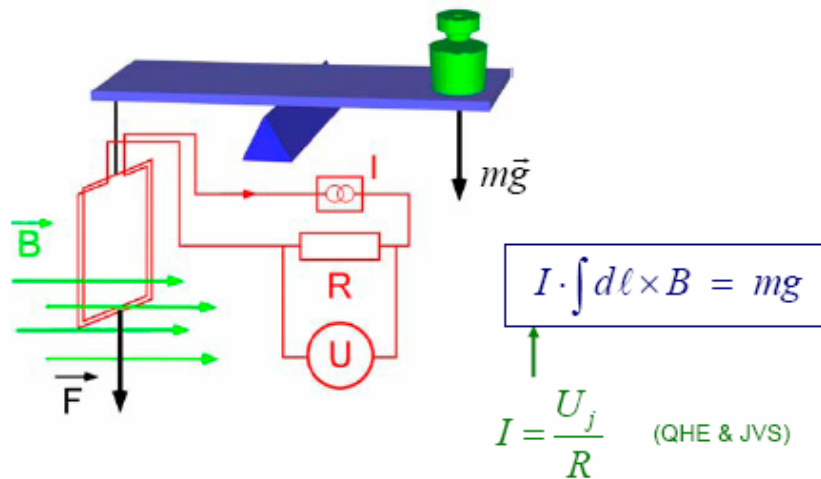
Измерения
напряжений,
сопротивлений, токов

Легко!

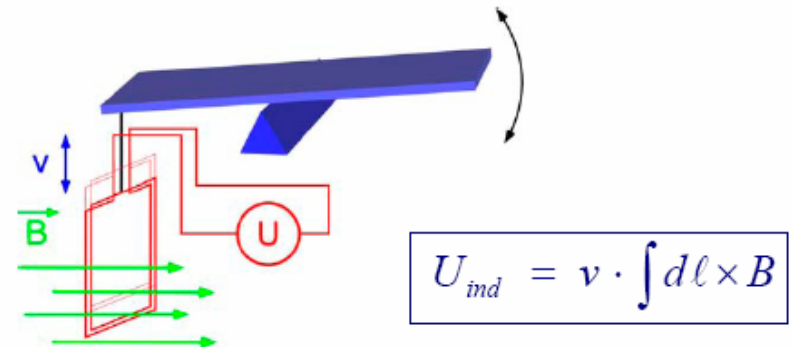


На пути к килограмму в терминах ФФК: ватт-весы

WB Principle (1): static phase / weighing mode



WB Principle (2): dynamic phase / velocity mode



WB Principle (3): combination of modes

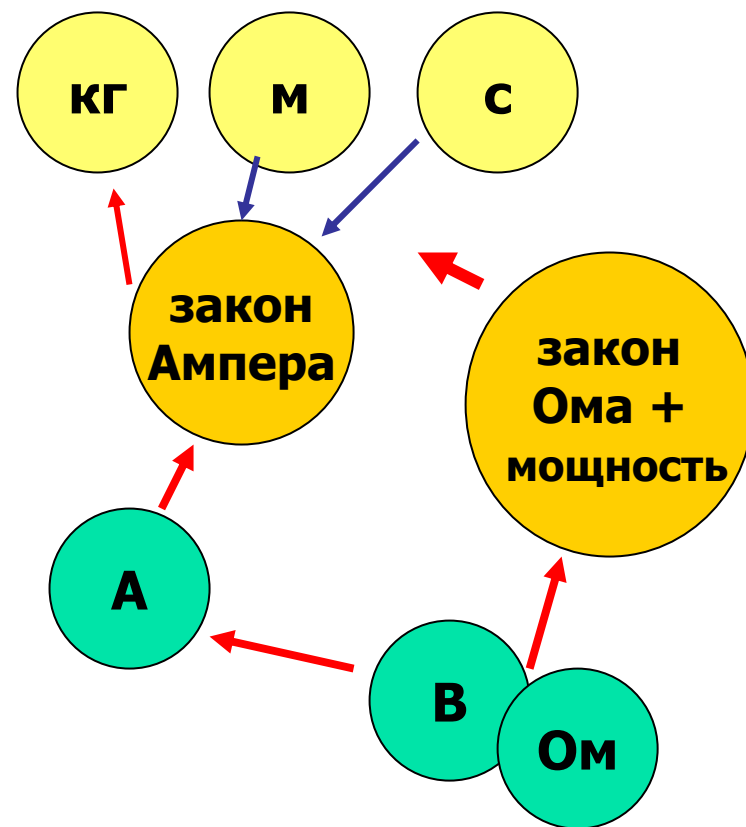
Only if $G_m = G_e$

$$G(B, \ell) = \underbrace{\frac{mg}{I}}_{\text{static}} = \underbrace{\frac{U}{v}}_{\text{dynamic}} \Rightarrow \boxed{UI = mgv}$$

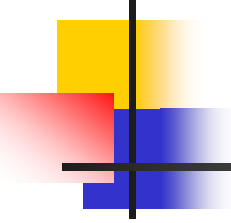
↑ electrical power
↑ mechanical power

Единицы электрических и механических величин в СИ

- Килограмм и ампер
- Электротехника
- Весы
- Мост между ними
- Практические единицы
- Перспективы

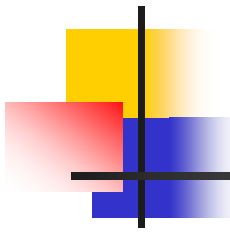


Будущее



Основные единицы физических величин в СИ: моль

- Определение
- Количество вещества и число частиц
- Отсутствие основного эталона
- Перспективы

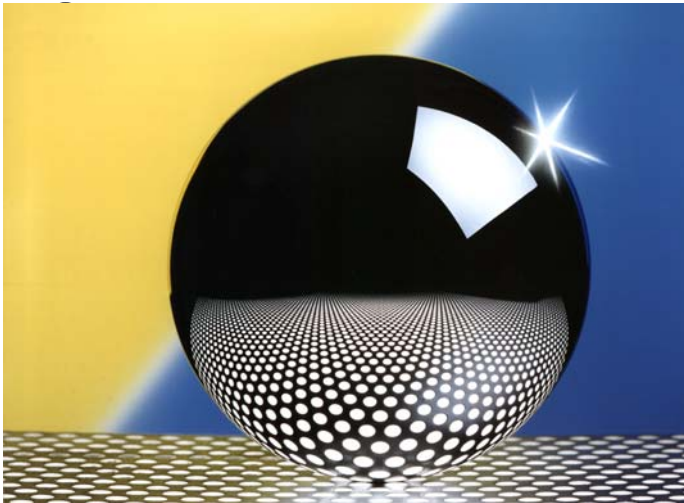


Основные единицы физических величин в СИ: моль

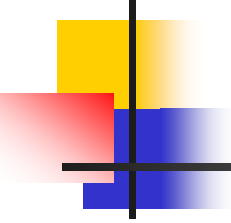
- Определение
- Количество вещества и число частиц
- Отсутствие основного эталона
- Перспективы
- Количество вещества: знаем массу, но не знаем сколько частиц
- Число частиц: знаем сколько частиц, но не знаем их массу

Основные единицы физических величин в СИ: моль

- Определение
- Количество вещества и число частиц
- Количество вещества: знаем массу, но не знаем сколько частиц



- Число частиц: знаем сколько частиц, но не знаем их массу

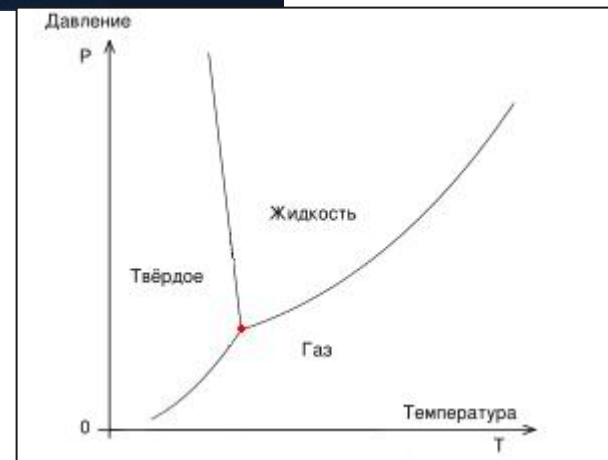
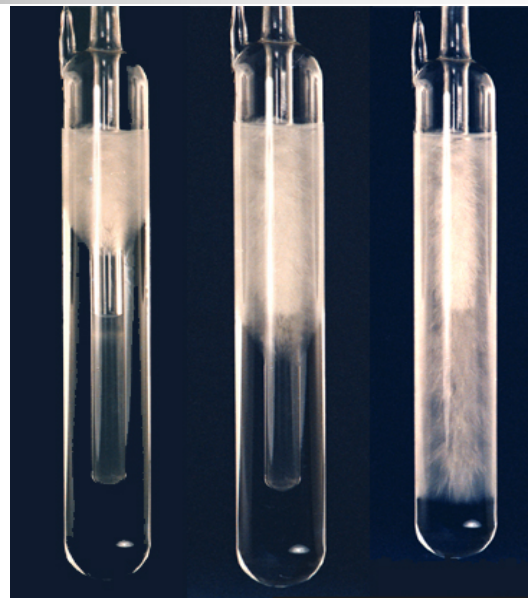


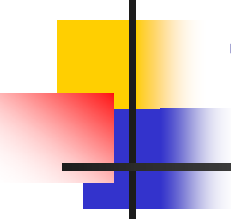
Основные единицы физических величин в СИ: моль

- Определение
- Количество вещества и число частиц
- Отсутствие основного эталона
- Перспективы

Основные единицы физических величин в СИ: кельвин

- Определение
- Энергия и температура
- Газовый термометр
- Реперные точки
- Практическая шкала
- Перспективы

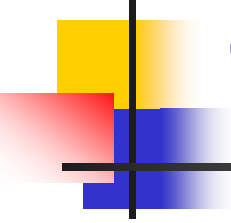




Температура и газовый термометр

Чтобы измерять нам нужно объект для сравнения (меру) и средство сравнения (весы).

- Меры – реперные (тройные) точки.
- «Температурные весы» - газовый термометр.
- ГТ включает
 - термостат с T , определяемой репером;
 - газовый объём (инертный газ).



Температура и газовый термометр

Чтобы измерять нам
нужно объект для
сравнения (меру) и
средство сравнения
(весы)

- Меры – реперные (тройные) точки.
- «Температурные весы» - газовый терм.

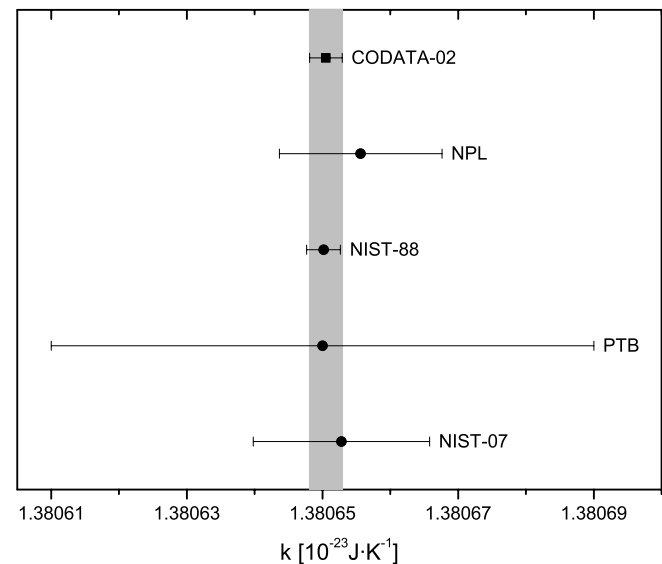
Газовый термометр – основа современной термометрии.

Характерные погрешности – единицы шестого знака.

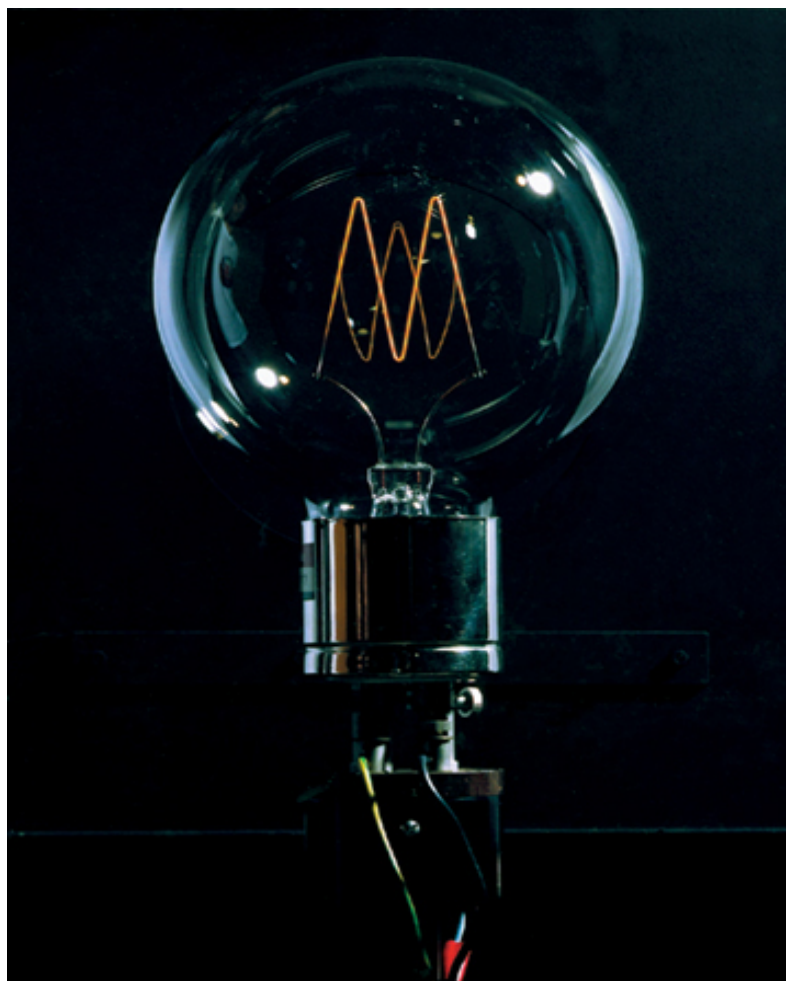
содержит
остат с T ,
целемой репером;
ый объём
(инертный газ).

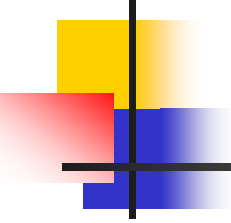
Основные единицы физических величин в СИ: кельвин

- Определение
- Энергия и температура
- Газовый термометр
- Реперные точки
- Практическая шкала
- Перспективы



Основная единица нефизической величины в СИ: кандела



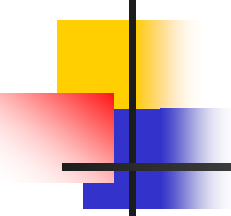


Естественная система единиц: СИ будущего

Секунда определена (1968)
на основе HFS в Cs
или другой частоты (в будущем).

Метр определен (1983) на основе
Фиксированного значения c .

Done!



Естественная система единиц: СИ будущего

Секунда определена (1968)
на основе HFS в Cs

или другой частоты

Метр определен (1983)
Фиксированного значения

Don

Килограмм будет переопределен
в терминах h .

Ампер переопределят
в терминах e .

2010-2011 ?

Естественная система единиц: СИ будущего

Кельвин будет выражаться
через k .

Моль - через N_A .

2010-2011 ?

лена (1968)

Hz в Cs

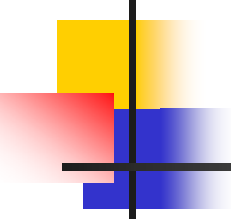
Килограмм будет переопределен
в терминах h .

Ампер переопределят
в терминах e .

2010-2011 ?

Фиксированного

Don

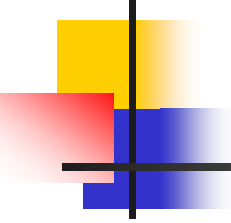


Две системы СИ: килограмм и ампер

Невозможно всё
успешно измерять
в одной системе
единиц (СИ).

Для остального
вводятся
практические
единицы.

Сейчас практические
единицы
используются в
электричестве, в
будущем, при
фиксировании h и
 e , практическая
единица массы.



Две системы СИ: килограмм и ампер

Невозможно всё

Сейчас практические

успешно
в одной
единице
Для о
ввод
пра
еди

Переопределение килограмма – не ради
улучшения в измерении массы,

а для оздоровления всей системы,
при улучшении измерений
электрических величин в СИ.

Это требует переопределения
двух единиц: килограмма и ампера.

тятся в
стве, в
при
нии h и
еская
ассы.