



# МЕЖДУНАРОДНЫЕ ПРОГРАММЫ ПО МЕТРОЛОГИИ

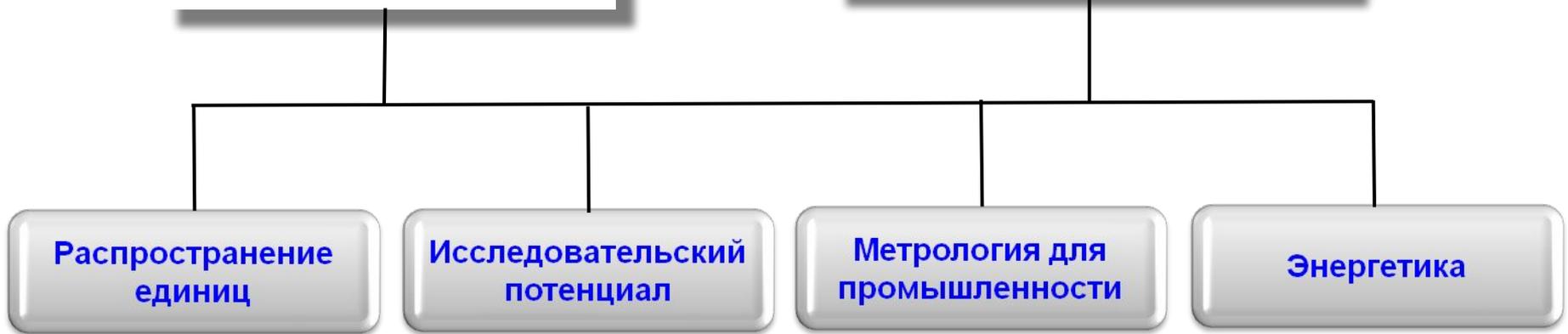
## АНАЛИЗ И ВЫВОДЫ

д.т.н., профессор Павел Неежмаков,  
генеральный директор  
ННЦ “Институт метрологии”,  
Харьков, Украина





## 1. Европейские исследовательские программы



## 2. Документ стратегического планирования ССЕМ

*“Большие проблемы в электромагнетизме”*

## 3. *Mise en pratique* (практические рекомендации) по видам измерений

## 4. Reports (доклады) консультативных комитетов по видам измерений



# Международные программы и документы по метрологии

Отрасли измерения  
“с переопределением”



Масса и связанные с ней  
величины

Ампер и электрические  
измерения

Кельвин и первичная  
термометрия

Уточнение и согласование  
ФФК

Отрасли измерения  
“без переопределения”



Оптические реперы времени  
и частоты

Нанометрология

Однофотоника

Световые технологии

Новые проблемы в  
метрологии



Терагерцовая метрология

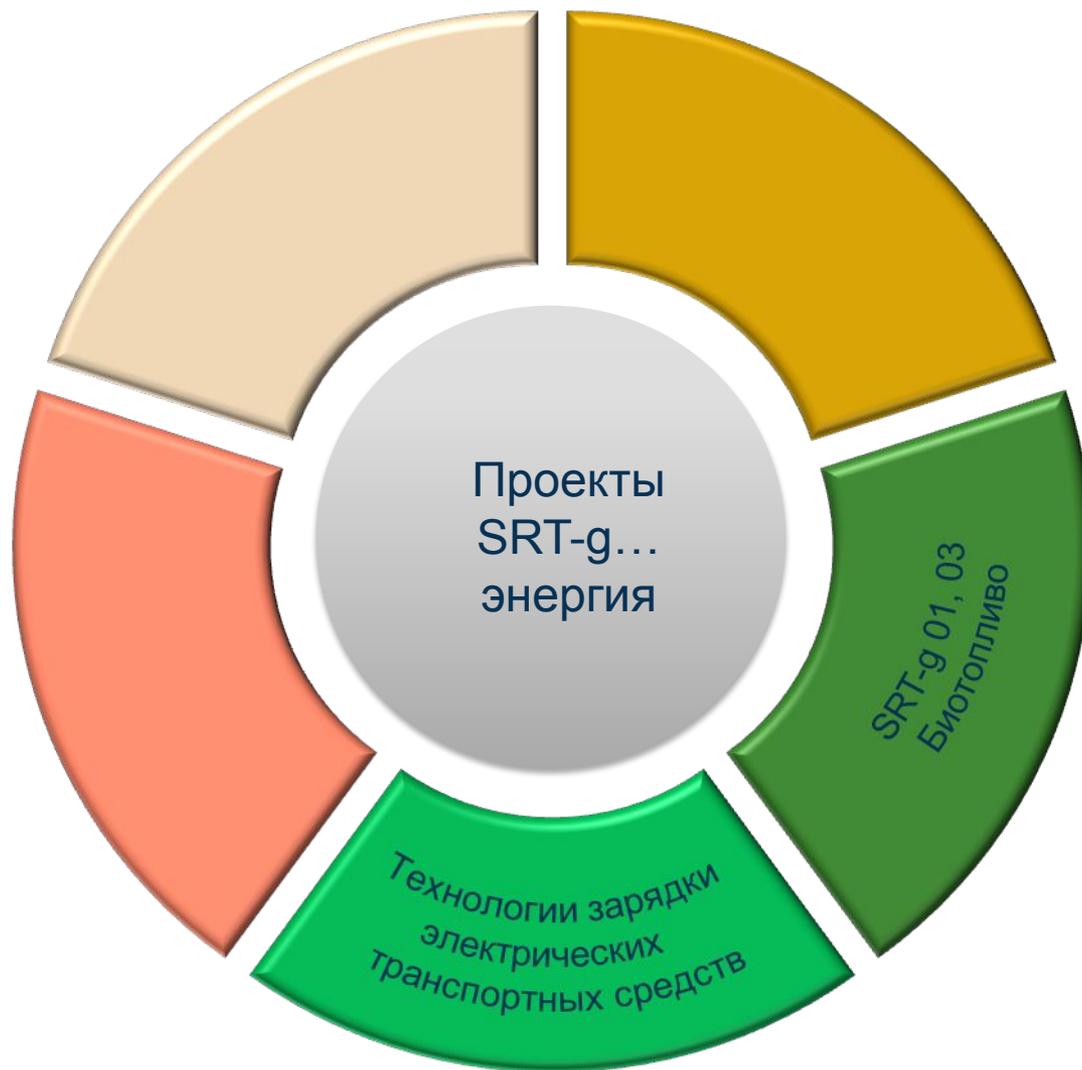
Квантовые вычисления  
(квантовые биты – кубиты)

Нанобиоэлектроника

Молекулярная электроника

Наноразмерная СВЧ-  
метрология и спинтроника

Наномагнетизм



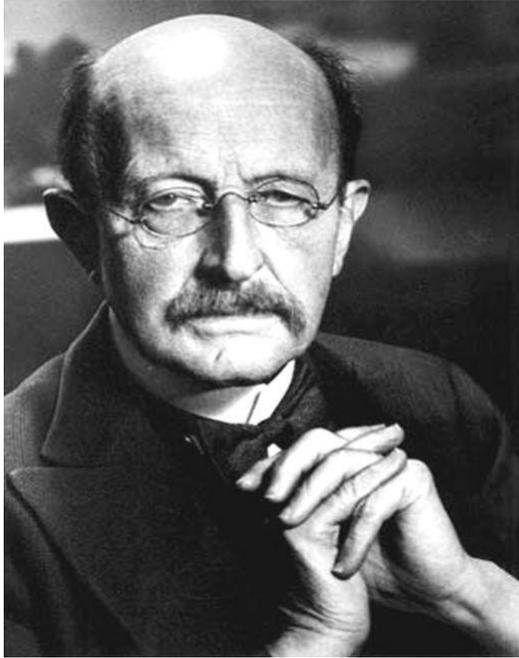


# Новая Международная система единиц



Создана в 1960 году CGPM





1900.

№ 1.

## ANNALEN DER PHYSIK.

VIERTE FOLGE. BAND 1.

### 4. *Ueber irreversible Strahlungsvorgänge; von Max Planck.*

Dem gegenüber dürfte es nicht ohne Interesse sein zu bemerken, dass mit Zuhülfenahme der beiden in dem Ausdruck (41) der Strahlungsentropie auftretenden Constanten  $a$  und  $b$  die Möglichkeit gegeben ist, Einheiten für Länge, Masse, Zeit und Temperatur aufzustellen, welche, unabhängig von speciellen Körpern oder Substanzen, ihre Bedeutung für alle Zeiten und für alle, auch ausserirdische und aussermenschliche Culturen notwendig behalten und welche daher als „natürliche Maasseinheiten“ bezeichnet werden können.

... с помощью **фундаментальных констант** мы имеем возможность создания единиц длины, времени, массы и температуры, которые обязательно сохранят свою жизнеспособность **для всех времен и культур**, даже **внеземных и нечеловеческих** ...

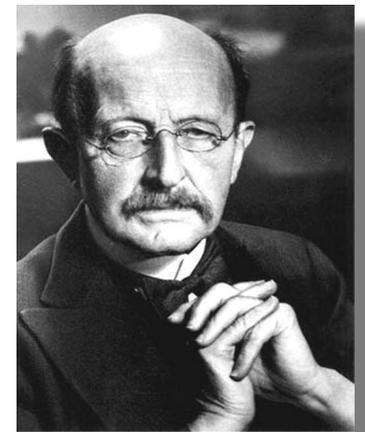
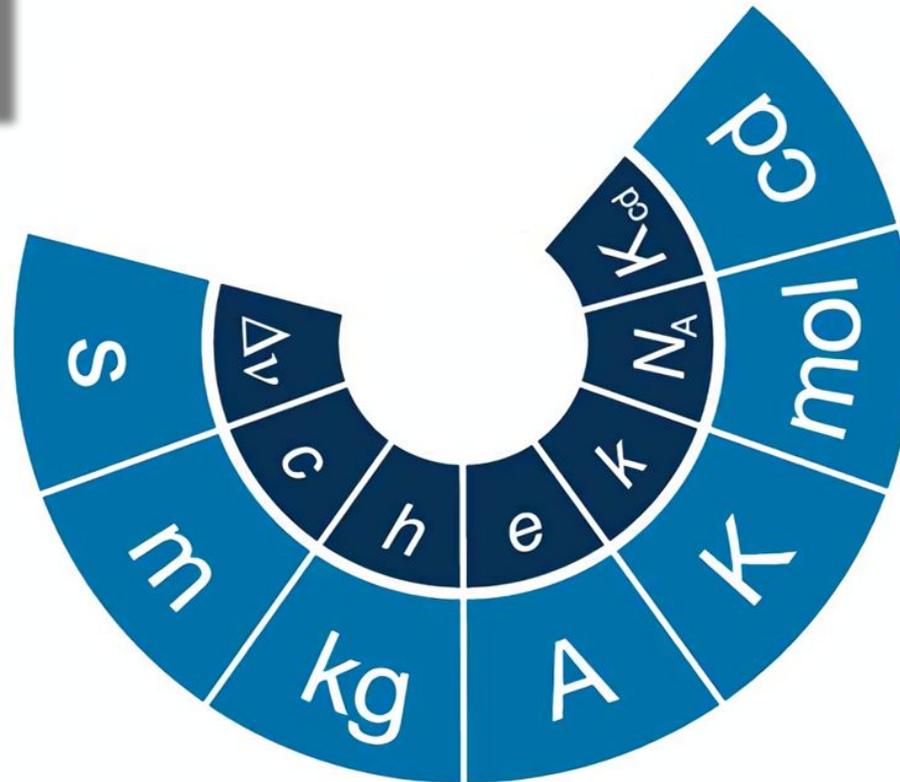


## Критерии нового определения

- **Неразрывность между реализациями старого и нового определения**
- **Реализация единицы с меньшей неопределенностью измерения (или, по меньшей мере, такой же)**
- **Улучшенная стабильность величины**
- **Последовательность и согласованность с другими базовыми единицами SI**
- **Возможность реализации в любом месте и в любое время, по крайней мере, в принципе**
- **Базирование на общепринятых законах физики**
- **Концептуально ясно и легко понять**



# Новая Международная система единиц



...для всех времен и культур...



## Проект New SI

<http://www.bipm.org/en/measurement-units/new-si/>

### Future revision of the SI

What?

Why?

When?

Ongoing work

Comm

→ At its 25th meeting (November 2014) the CGPM adopted a Resolution on the future revision of the International System of Units. This Resolution built on the CGPM's previous Resolution (2011), which took note of the CIPM's intention to propose a revision of the SI and set out a detailed road-map towards the future changes.

In the "New SI" four of the SI base units – namely the kilogram, the ampere, the kelvin and the mole – will be redefined in terms of constants; the new definitions will be based on fixed numerical values of the Planck constant ( $h$ ), the elementary charge ( $e$ ), the Boltzmann constant ( $k_B$ ), and the Avogadro constant ( $N_A$ ), respectively. Further, the definitions of all seven base units of the SI will also be uniformly expressed using the explicit-constant formulation, and specific *mises en pratique* will be drawn up to explain the realization of the definitions of each of the base units in a practical way.



### Международная система единиц SI будет системой единиц, в которой:

- частота перехода, связанного со сверхтонким расщеплением основного состояния атома цезия-133,  $\Delta\nu(^{133}\text{Cs})_{\text{СТР}} = 9192631770$  Гц **ТОЧНО**;
- скорость света в вакууме  $c_0 = 299792458$  м/с **ТОЧНО**;
- постоянная Планка  $h = 6,626068 \cdot 10^{-34}$  Дж·с **ТОЧНО**;
- элементарный заряд  $e = 1,602117 \cdot 10^{-19}$  Кл **ТОЧНО**;
- постоянная Больцмана  $k = 1,380658 \cdot 10^{-23}$  Дж/К **ТОЧНО**;
- постоянная Авогадро  $N_A = 6,02214 \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup> **ТОЧНО**;
- спектральная сила светового потока монохроматического излучения частотой  $540 \cdot 10^{12}$  Гц  $K(\lambda_{555}) = 683$  лм/Вт **ТОЧНО**



- Отсюда вытекает, что **в SI останется действующий набор семи базовых единиц**, в частности:
- **килограмм** остается единицей массы, но его размер будет установлен фиксированием численного значения постоянной Планка;
  - **ампер** остается единицей электрического тока, но его размер будет установлено фиксированием численного значения элементарного заряда;
  - **кельвин** остается единицей термодинамической температуры, но его размер будет установлен фиксированием численного значения постоянной Больцмана;
  - **моль** останется единицей количества вещества, которая определяется чистом структурных элементов), но его размер будет установлен фиксированием числа Авогадро

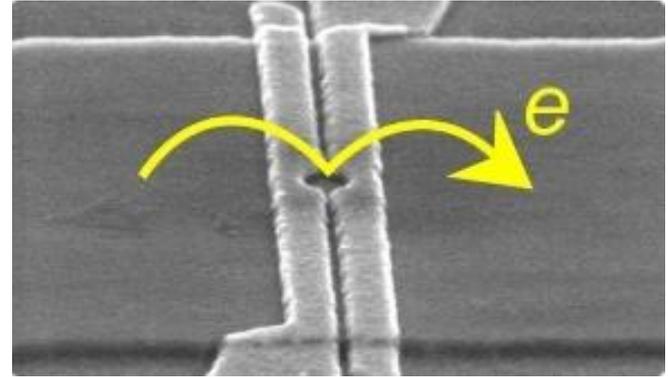


- **Все основные** единицы устанавливаются в **неявном виде**, путем фиксации соответствующих физических постоянных
- **Существенно изменяется** определение **килограмма, ампера, кельвина и моля**, что ведет к изменению методологии их воспроизведения и передачи
- Принятие New SI означает **доминирование квантовых и нанотехнологий** в метрологии
- **Прослеживаемость** основных единиц к ФК **может** в перспективе **привести к изменению стратегии** метрологического обеспечения *(децентрализации)*



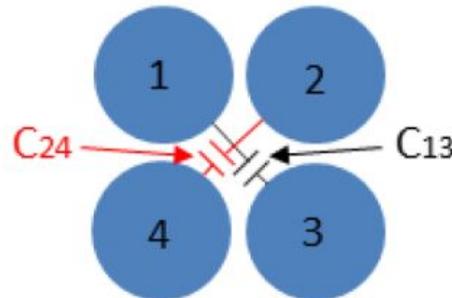
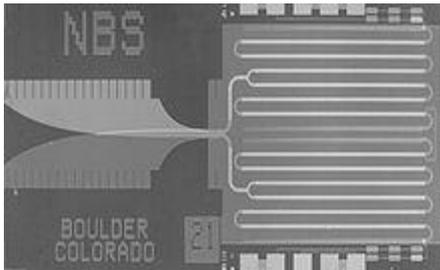
## 3 варианта реализации Ампера

Используя устройство переноса единичного электрона, связь единиц  $A = C/s$ , значение  $e$  и реализацию секунды  $s$



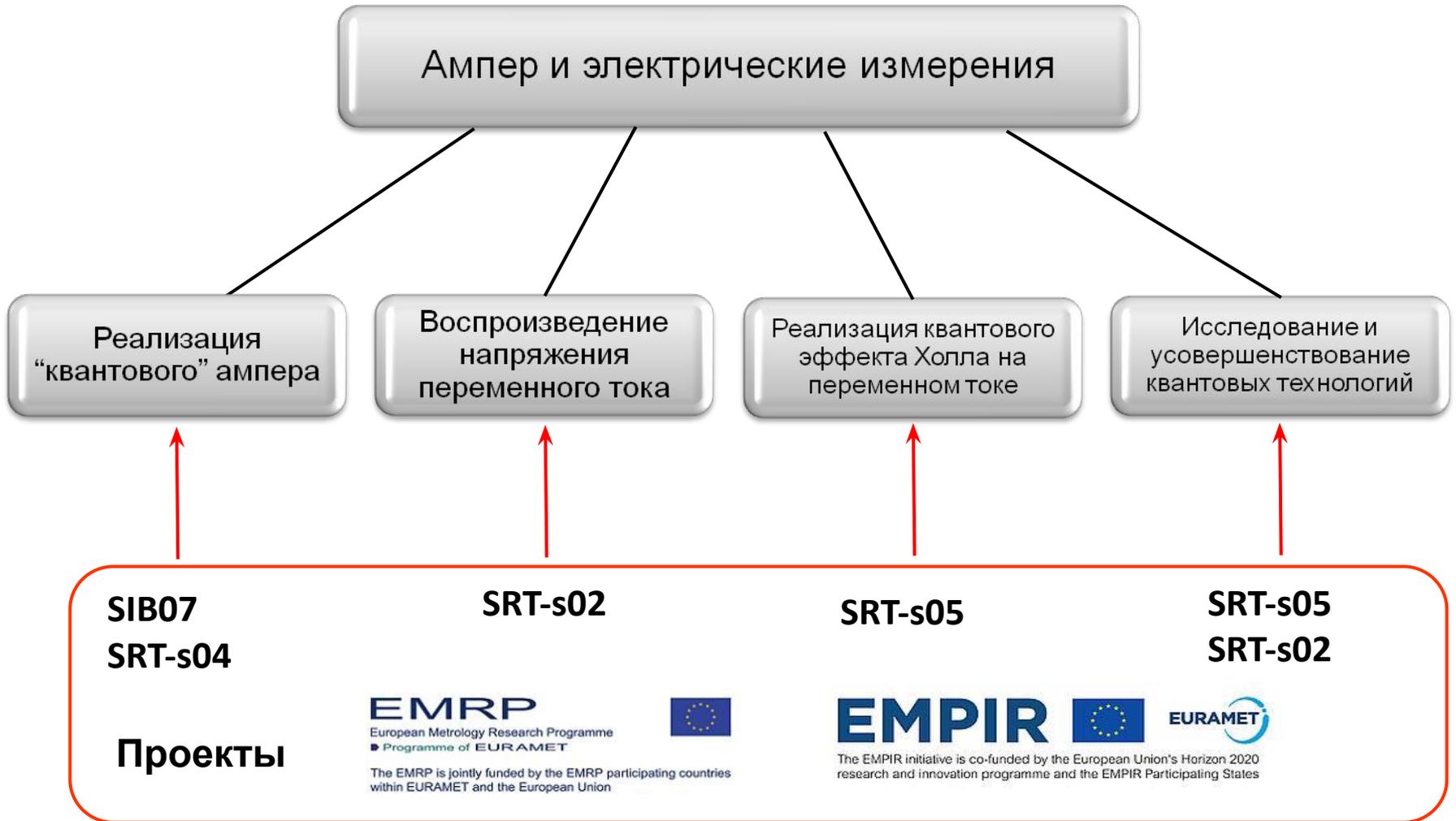
Используя закон Ома, связь единиц  $A = V/\Omega$ , а также практические реализации единиц вольта  $V$  и ома  $\Omega$ , которые базируются на эффекте Джозефсона и квантовом эффекте Холла

Используя связь единиц  $I = C \cdot dU/dt$ , связь единиц  $A = \Phi \cdot V/s$ , и практические реализации единиц вольта  $V$  и фарада  $\Phi$ , а также основную единицу SI секунду  $s$  (применяя линейное изменяющееся напряжение  $dU/dt$  на конденсатор емкостью  $C$ )





# New SI и электрические единицы



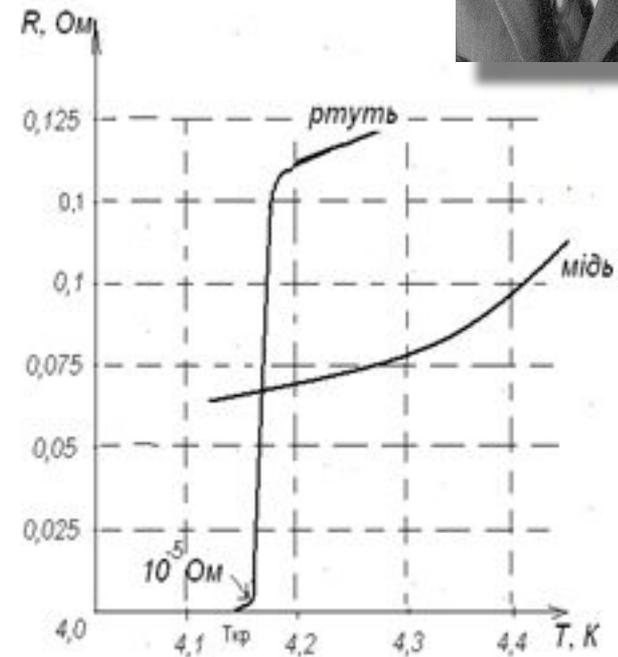
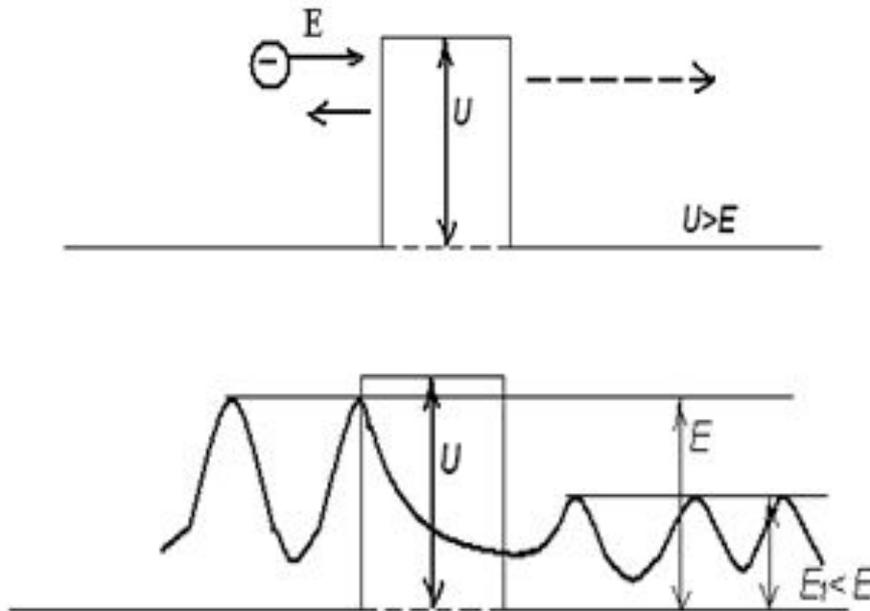


## Физические эффекты

## Сверхпроводимость, эффект Мейснера

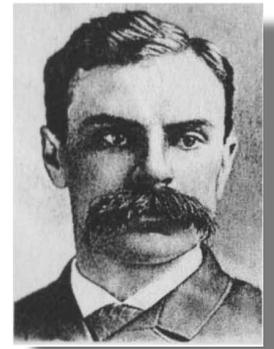
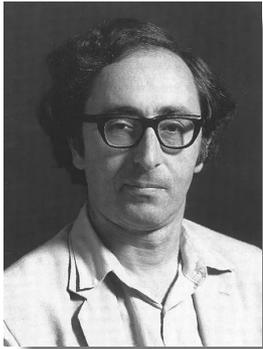
### Квантовый переход

#### Туннелирование электронов





## Квантовые эффекты



Эффект Джозефсона  $U_J = n \frac{h}{2e} f_0$  [В]

Квантовый эффект Холла  $R_x = \frac{h}{me^2}$  [Ом]

Ядерный магнитный резонанс  $B = \frac{2\pi f_{\text{ямп}}}{\gamma_p}$  [Тл]

Одноэлектронное туннелирование  $I = ef_T$  [А]



## New SI и электрические единицы

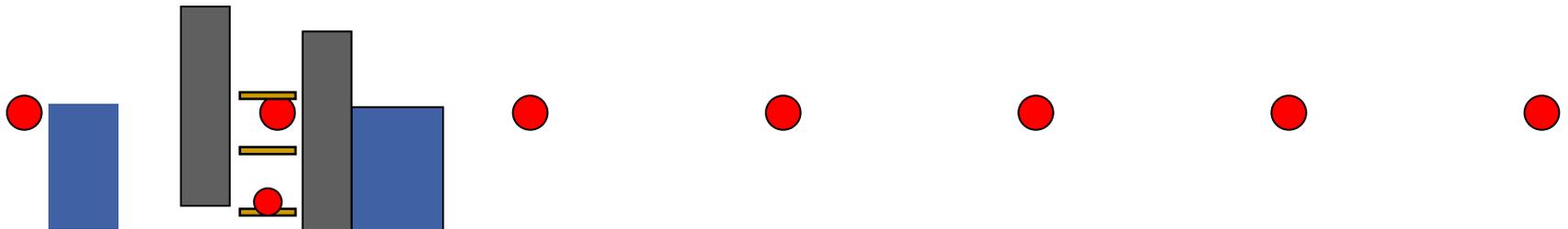
Международная система единиц SI будет системой единиц, в которой:

... элементарный заряд равен  $1,60217\text{X} \times 10^{-19}$  **Ас**

**Возможная реализация:**

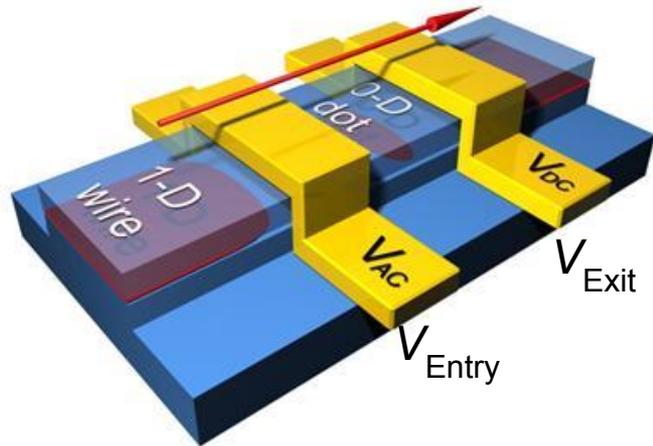
Генерация квантованного тока  $I = e \cdot f$  путем  
*последовательной накачки единичных электронов*

*f: частота накачки; e: заряд электрона*

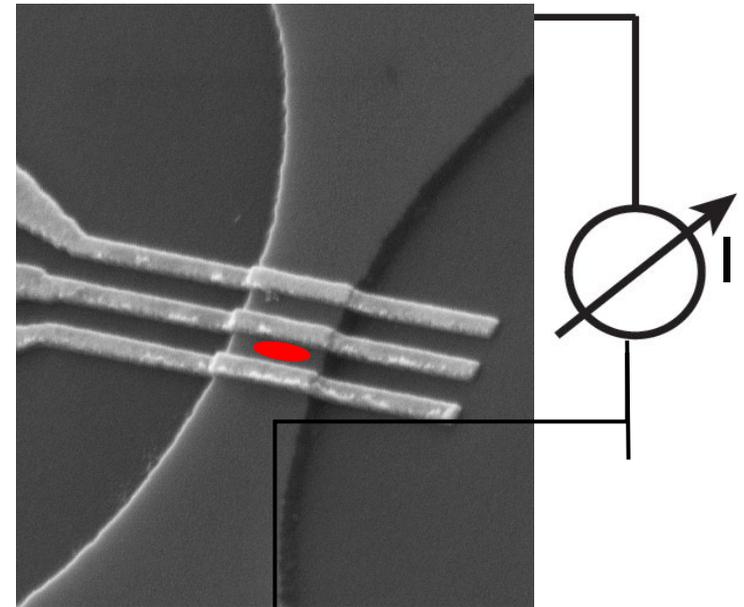
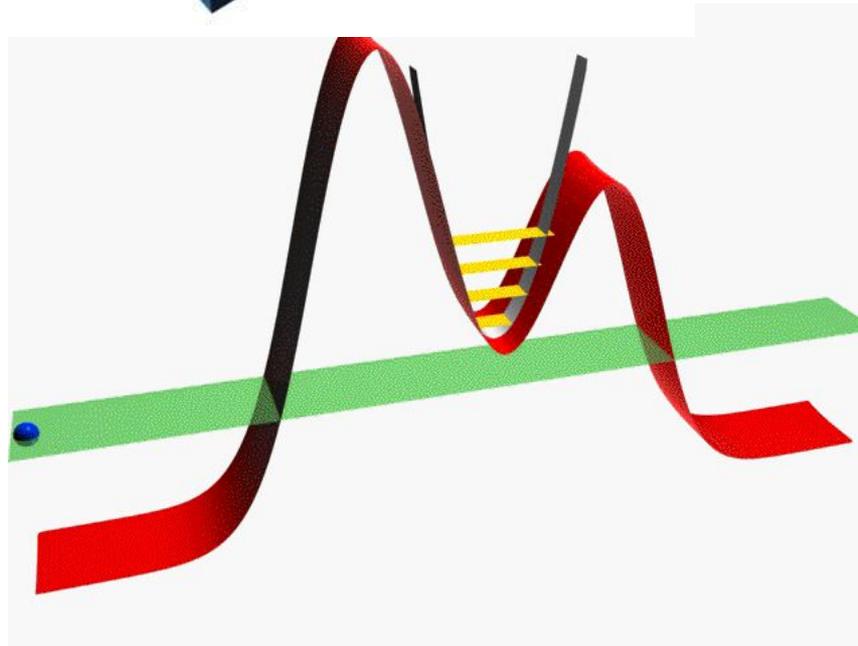




## New SI и электрические единицы



- **GaAs/AlGaAs** квантовая точка
- Захватывает и выталкивает один электрон за цикл напряжения управления

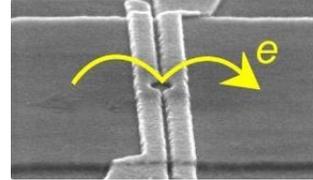


*Экспертиза: Kaestner & Kashcheyevs,  
Rep. Prog. Phys. 78, 103901 (2015)*



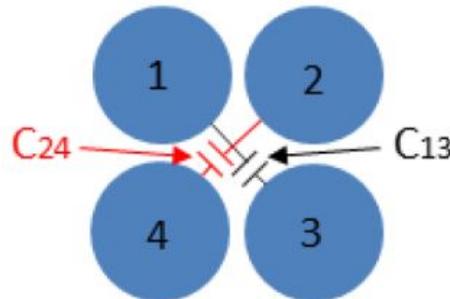
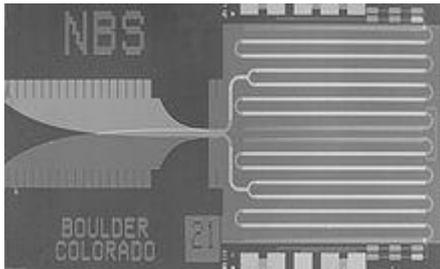
## 3 варианта реализации Ампера

Используя устройство переноса единичного электрона, связь единиц  $A = C/s$ , значение  $e$  и реализацию секунды  $s$



Используя закон Ома, связь единиц  $A = V/\Omega$ , а также практические реализации единиц вольты  $V$  и ома  $\Omega$ , которые базируются на эффекте Джозефсона и квантовом эффекте Холла

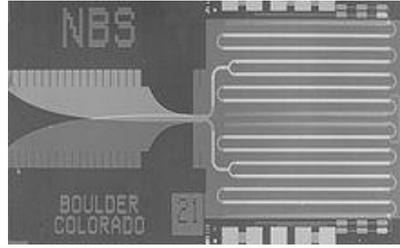
Используя связь единиц  $I = C \cdot dU/dt$ , связь единиц  $A = \Phi \cdot V/s$ , и практические реализации единиц вольты  $V$  и фарада  $\Phi$ , а также основную единицу SI секунду  $s$  (применяя линейное изменяющееся напряжение  $dU/dt$  на конденсатор емкостью  $C$ )



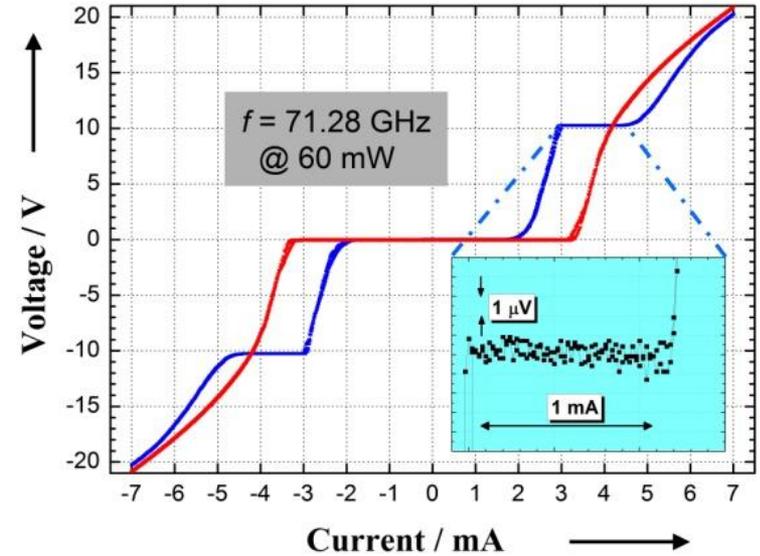


## New SI и электрические единицы

**Вольт В может реализовываться с помощью эффекта Джозефсона и значения постоянной  $K_J$  Джозефсона**



**С помощью пересмотренных SI:**  
условное значение  $K_{J,90}$  заменяется значением, которое базируется на значениях  $h$  и  $e$   
Существующая неопределенность  $4 \cdot 10^{-7}$  удаляется



### **Влияние:**

При расчетах (SW) измерений напряжения, основанных на эффектах переменного тока Джозефсона, необходимо использовать новое значение (# разрядов?)

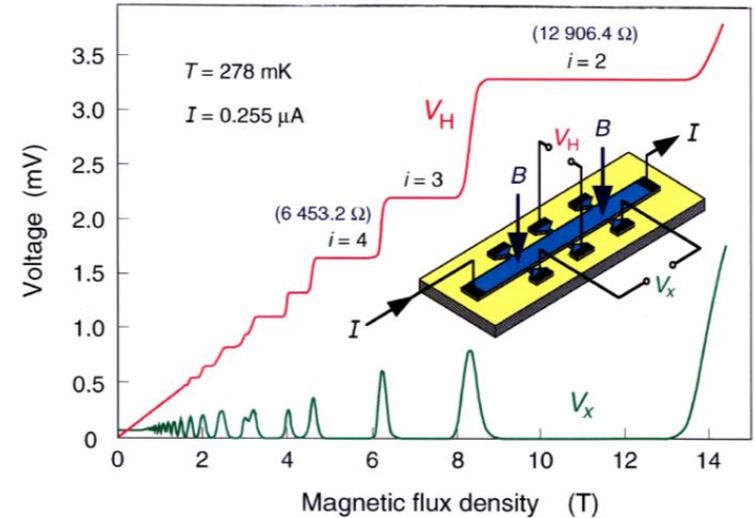
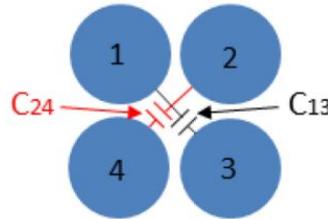
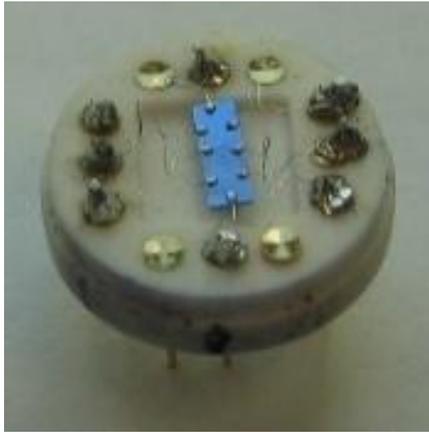
Ступенчатое изменение  $\approx 0,1 \text{ ppm}$  (коэффициент согласованности  $\neq 1!$ )

При практических измерениях с использованием эталонов с напряжением Зенера, это всего лишь заметно, но в 100 раз больше в существующих реализациях квантового эталона!



## New SI и электрические единицы

Ом может реализовываться с помощью квантового эффекта Холла, величины постоянной  $R_K$  фон Клитцинга, расчетного конденсатора и величины  $\epsilon_0$



### С помощью пересмотренных единиц SI:

- $R_{K,90}$  условное значение заменяется значением, которое основывается на значениях  $h$  и  $e$
- Существующая неопределенность  $1 \cdot 10^{-7}$  удаляется

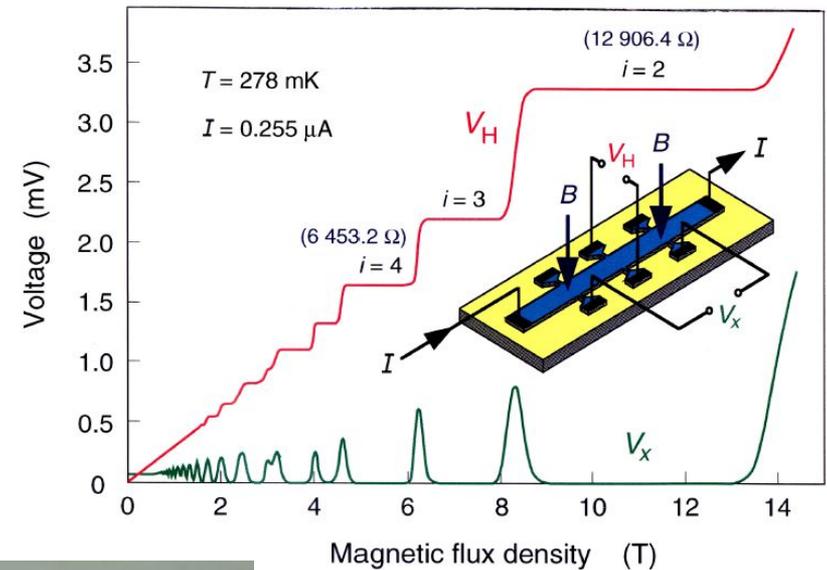
### Влияние:

- При расчетах (SW) измерений сопротивления, основанных на квантовом эффекте Холла, необходимо использовать новое значение (# разрядов?)
- Ступенчатое изменение  $\approx 0,02 \text{ ppm} \Rightarrow$  всего лишь заметно в лучших реализациях (квантового) эталона



## New SI и электрические единицы

Ом может реализовываться с помощью квантового эффекта Холла, величины постоянной  $R_K$  фон Клитцинга, расчетного конденсатора и величины  $\epsilon_0$



QRH 6800A



### Магнитная постоянная $\mu_0$ и связанные с ней величины

Связи между  $\mu_0$ ,  $\varepsilon_0$ ,  $Z_0$  и  $c$  остаются неизменными

$$\varepsilon_0 = 1/\mu_0 c^2$$

$$Z_0 = \mu_0 c = (\mu_0/\varepsilon_0)^{1/2}$$

$$c = 299\,792\,458 \text{ m s}^{-1}$$

Однако,  $\mu_0$  больше не имеет точного значения  $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N}_\text{A}^{-2}$  и должна определяться **экспериментально** по формуле

$$\mu_0 = \alpha \frac{2h}{ce^2}$$

$c$ ,  $h$  и  $e$  являются точными в пересмотренных SI  $\Rightarrow \mu_0$ ,  $\varepsilon_0$ ,  $Z_0$  будут обладать такой же относительной неопределенностью, как и постоянная тонкой структуры  $\alpha$



## New SI и электрические единицы

Пересмотренная SI имеет **главное влияние на электрические единицы**:  
имеющиеся в данный момент квантовые эталоны становятся прямыми  
реализациями единиц SI  **$V, R, I$**

**Усовершенствования квантовых эталонов приводят к  
прямому улучшению реализации единиц**

### **Другие практические последствия:**

- Небольшое ступенчатое изменение  $V$  видимо лишь на промышленном уровне (но в сто раз больше чем реализация с использованием эталона Джозефсона)
- Величины  $R_K$  и  $K_J$  должны обновляться в определенную фиксированную дату во всех программных обеспечениях НМИ и промышленности
- $\mu_0$  больше не является точной и должна определяться экспериментальным путем
- Влиянием ступенчатых изменений на другие величины можно практически пренебречь



# Развитие квантовых и нанотехнологий

- Создание измерителей **переменного тока** на эффекте Джозефсона
- Реализация квантового эффекта Холла на переменном токе
- Реализация **одноэлектронной технологии**
- Создание **безгелиевых** охладителей
- Усовершенствование технологий изготовления квантовых структур
- Внедрение новых материалов (**графен, нанотрубки**)

**Главные цели:** повышение метрологических возможностей;  
большая доступность для практической метрологии

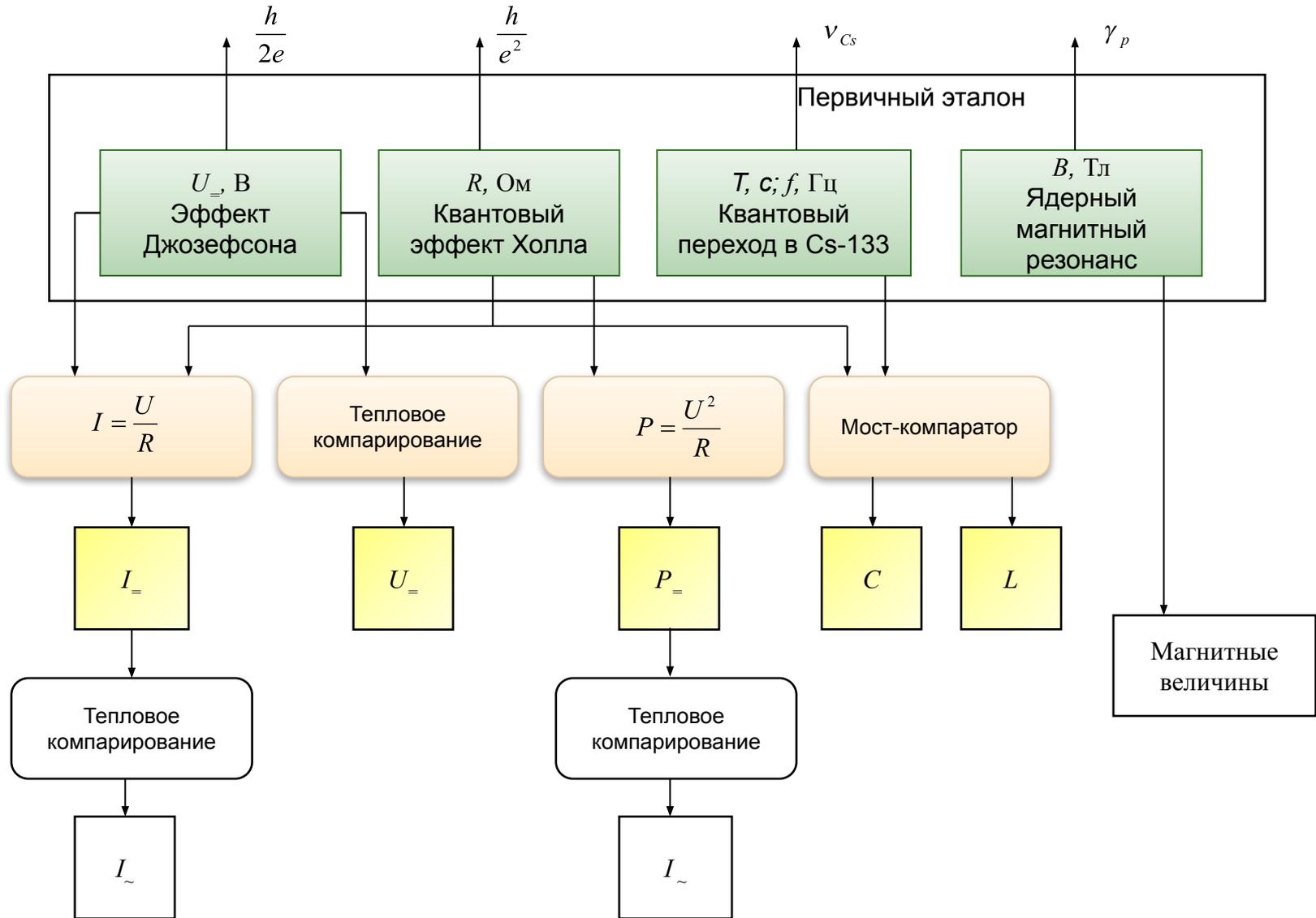


### Перспектива – квантовый эффект Холла на графене

Характеристики эталона	Существующая структура меры Холла	Структура на графене (прогноз)
Охлаждение	Жидкий гелий + <b>дросселирование</b>	Без жидкого гелия
Температура	1,2 К	3-5 К
Магнитная индукция	~ 8 Тл	< 2 Тл
Частота переменного тока	~ 1 кГц	До 100 кГц
<b>Неопределенность</b> - на постоянном токе - на переменном токе	<b><math>10^{-8}</math></b> <b><math>10^{-7}</math></b>	<b><math>10^{-9}</math></b> <b><math>10^{-8}</math></b>



# Новая система воспроизведения единиц в области электрических измерений





# New SI и килограмм





### Условия ССМ (перед переопределением)

#### R1 Согласованность

Три независимых эксперимента (XRCD и WB)  
с согласованными результатами с  $u_{rel} < 5 \cdot 10^{-8}$

#### R2 Неопределенность

Как минимум один результат с  $u_{rel} < 2 \cdot 10^{-8}$

#### R3 Прослеживаемость

Внеплановая **калибровка** с IPK в **VIPM**

#### R4 Валидация

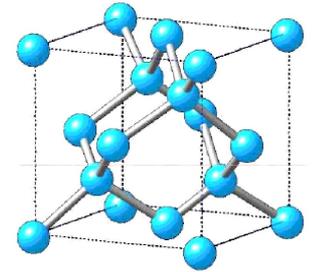
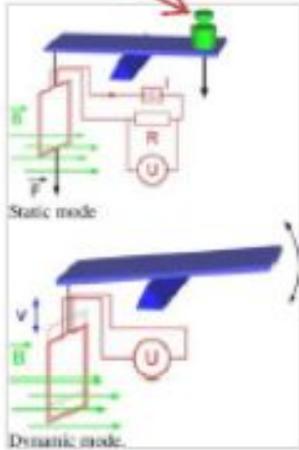
**Валидация** *mise en pratique* в соответствии с Соглашением CIPM-MRA



# New SI и килограмм

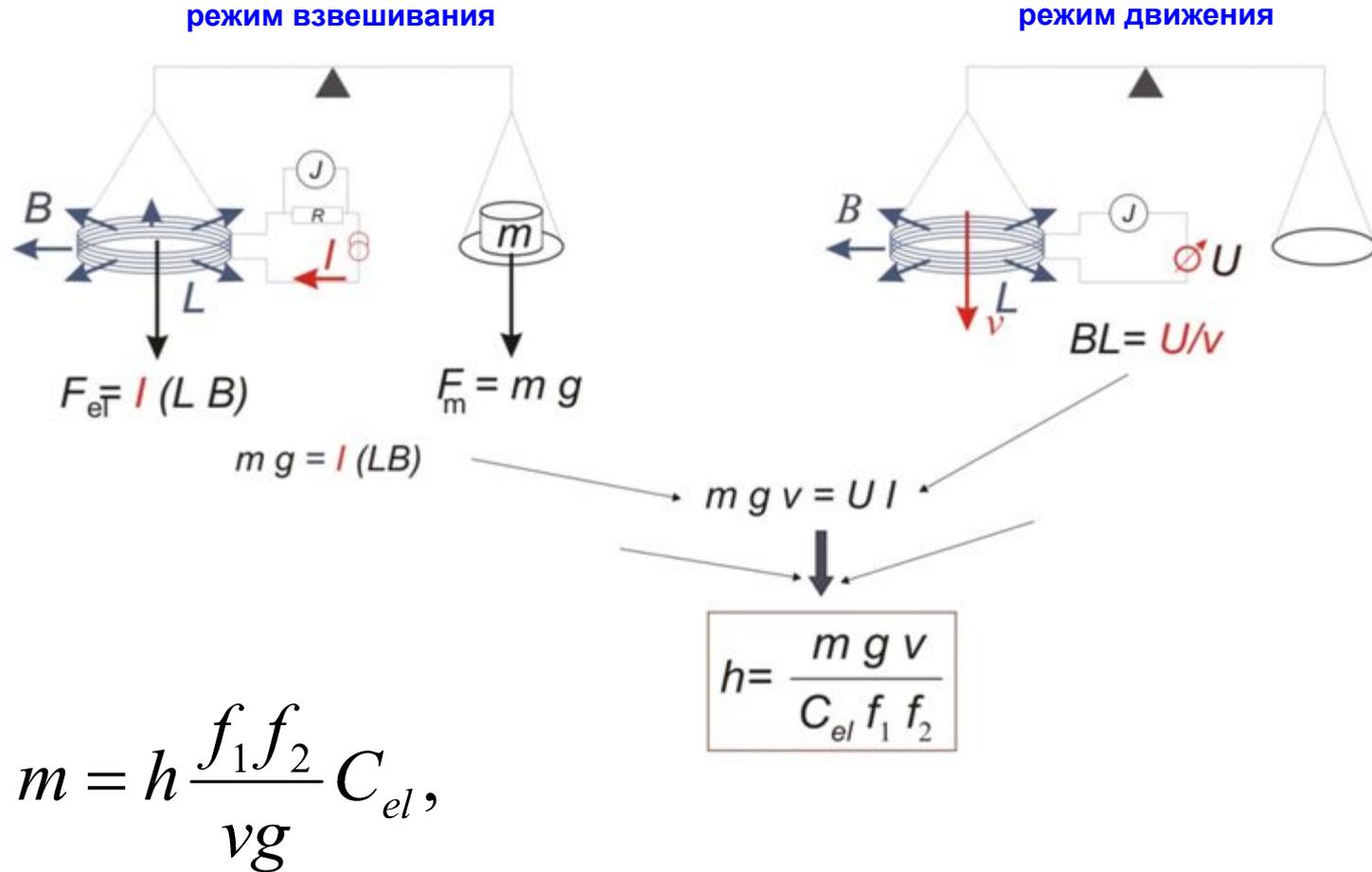
## Первичные методы реализации определения килограмма

- 1 Реализация с помощью **сравнения** электрической и механической **мощности**
- 2 Реализация с помощью метода **рентгеновского анализа плотности кристалла**





## “Электрический” килограмм





**Брайан Киббл**

**С этого момента является предпочтительным использование термина «весы Киббла» во всех документах ССУ**

Таблица 1 – Результат определения  $\gamma'_p$

Дата публикации, лаборатория <sup>1</sup> , автор	$\gamma'_p$	$\gamma'_p$	$\gamma'_p$	Неопределенность (ppm)	Экв. номер
---	-------------	-------------	-------------	------------------------	------------

## Высокое поле

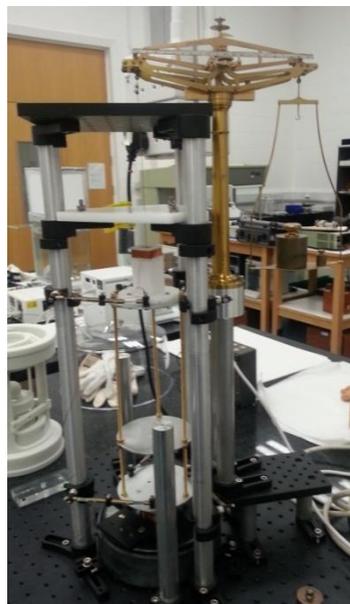
	$10^H A_{IAR} \cdot c \cdot \text{кг}^{-1}$	$10^H A_{BIPM} \cdot c \cdot \text{кг}^{-1}$	$10^H A_{B169} \cdot c \cdot \text{гк}^{-1}$		
1966, <b>KhGNIIM</b> , Ягола, Зингерман, Сепетый <sup>2</sup>	2.675079(20) <sup>4</sup>	2.675101(20)	2.675130(20)	7.4	(14.5)
1971, NPL, <b>Киббл и Хант</b> <sup>3</sup>	2.675075(43)		2.675075(43)	16	(14.6)

<sup>1</sup>ETL = Электротехническая лаборатория, Япония; **KhGNIIM** - Харьковский государственный научно-исследовательский институт метрологии, СССР.

<sup>2</sup>Ссылки [0.1, 14.7, 14.8].

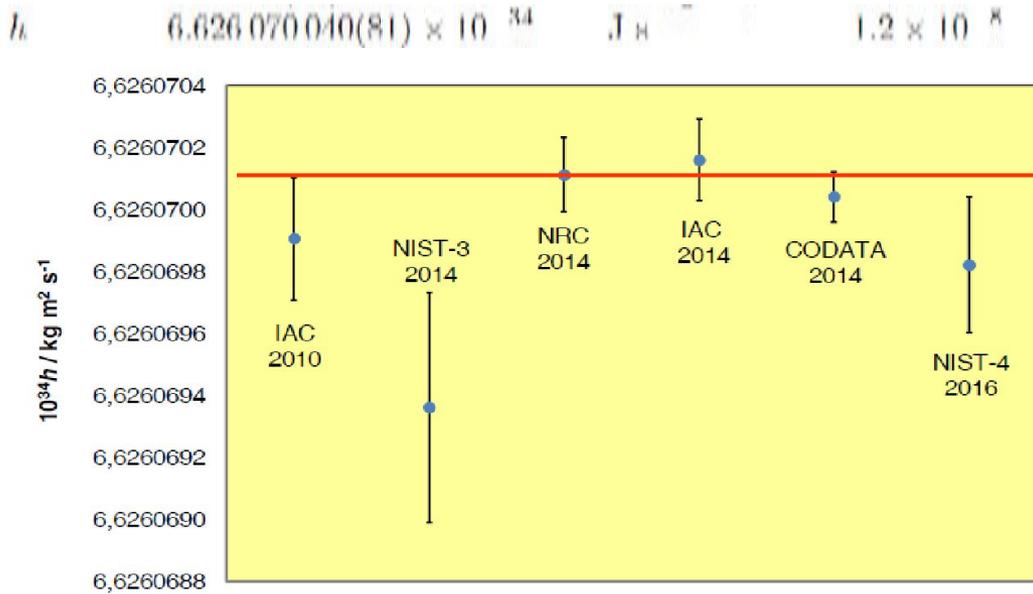
<sup>3</sup>Ссылки [14.9, 14.10].

<sup>4</sup>Этот результат в выражении  $A_{MM}$ , хранящийся во ВНИИМ ампер





# Значения постоянной Планка



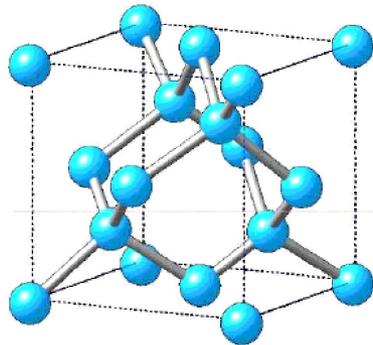


Амедео  
Авогад  
ро  
(1776-1856)

1. Объем  $a_0^3$  элементарной ячейки
2. Объем атома:  $a_0^3 / 8$
3. Объем  $V$  сферы
4. Число  $N$  атомов

$$N_A = \frac{8 V}{a_0^3} \cdot \frac{M_{\text{mol}}}{m_{\text{sphere}}}$$

## Использование кристалла кремния





## New SI и килограмм

### Значения фундаментальных физических констант, рекомендуемые CODATA: 2014\*

Питер Дж. Мохр, Дэвид Б. Ньювел, Барри Н. Тейлор

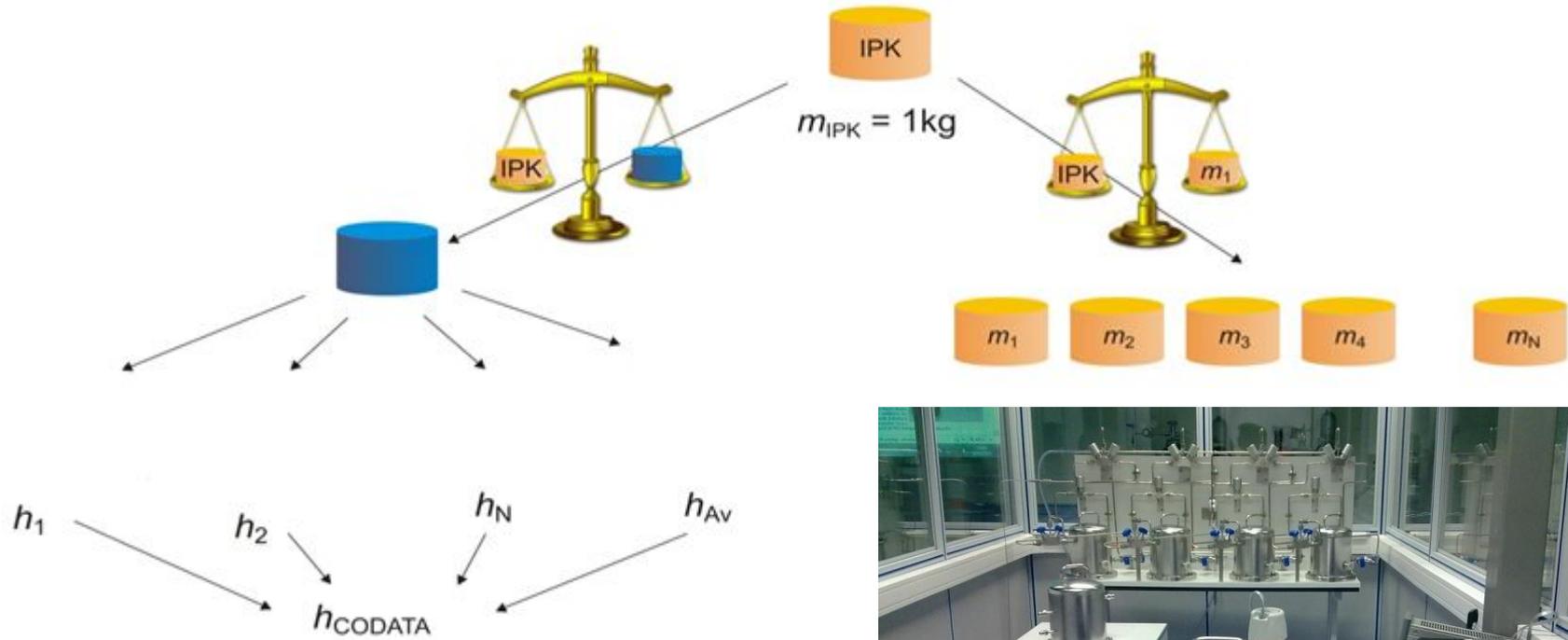
Национальный Институт стандартов и технологий, Геттисберг, Мериленд 20899-8420, США (30 июня 2015 г.)

Таблица 2. Сокращенный список рекомендуемых CODATA значений фундаментальных физических и химических констант

Показатель	Символ	Численное значение	Единицы	Относ. станд. неопределенность
скорость света в вакууме	$c, c_0$	299 792 458	м с <sup>-1</sup>	точно
магнитная постоянная	$\mu_0$	$4\pi \times 10^{-7} = 12.566\ 370\ 614\dots \times 10^{-7}$	Н <sup>-2</sup>	точно
электрическая постоянная $1/\mu_0 c^2$	$\epsilon_0$	$8.854\ 187\ 817\dots \times 10^{-12}$	Ф м <sup>-1</sup>	точно
гравитационная постоянная	$G$	$6.674\ 08(31) \times 10^{-11}$	м <sup>3</sup> кг <sup>-1</sup> с <sup>-2</sup>	$4.7 \times 10^{-5}$
<b>постоянная Планка</b>	<b><math>h</math></b>	<b><math>6.626\ 070\ 040(81) \times 10^{-34}</math></b>	<b>Дж с</b>	<b><math>1.2 \times 10^{-8}</math></b>
$h/2\pi$	$\hbar$	$1.054\ 571\ 800(13) \times 10^{-34}$	Дж с	$1.2 \times 10^{-8}$
элементарный заряд	$e$	$1.602\ 176\ 6208(98) \times 10^{-19}$	Кл	$6.1 \times 10^{-9}$
Постоянная Ридберга	$R_\infty$	$10\ 973\ 731.568\ 508(65)$	м <sup>-1</sup>	$5.9 \times 10^{-12}$
Постоянная Авогадро	$N_A, L$	$6.022\ 140\ 857(74) \times 10^{23}$	моль <sup>-1</sup>	$1.2 \times 10^{-8}$
Постоянная Больцмана	$k$	$1.380\ 648\ 52(79) \times 10^{-23}$	Дж К <sup>-1</sup>	$5.7 \times 10^{-7}$
Постоянная Джозефсона	$K_J$	$483\ 597.8525(30) \times 10^9$	Гц В <sup>-1</sup>	$6.1 \times 10^{-9}$
Постоянная фон Клитцинга	$R_K$	$25\ 812.807\ 4555(59)$	Ω	$2.3 \times 10^{-10}$



## Прослеживаемость “природных” эталонов килограмма к ИПК





число частиц X



$$n(X) = \frac{N(X)}{N_A}$$

количество  
вещества X



$N_A$

постоянная  
Авогадро



Si XRCD (уникальный метод)  $N(^{28}\text{Si}) = \frac{8V_s}{a(^{28}\text{Si})^3}$

Гравиметрия  
(используется наиболее широко)  $N(X) = \frac{w(X)m}{m_a(X)}$

Газовый анализ

$$N = \frac{pV}{kT}$$

Электролиз

$$N = \frac{Q}{ze}$$



Draft for Appendix 2 of the SI Brochure for the « New SI »

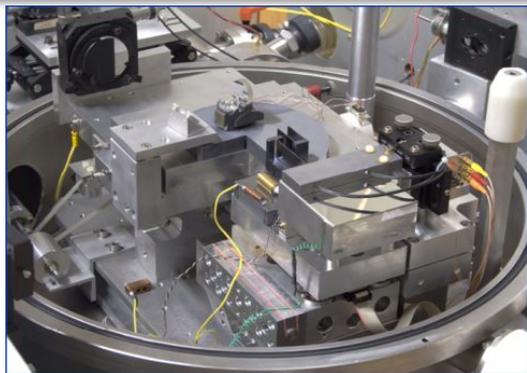
## Mise en pratique of the definition of the mole

Consultative Committee for Amount of Substance – Metrology in Chemistry and Biology (CCQM)  
Ad hoc Working Group on the mole

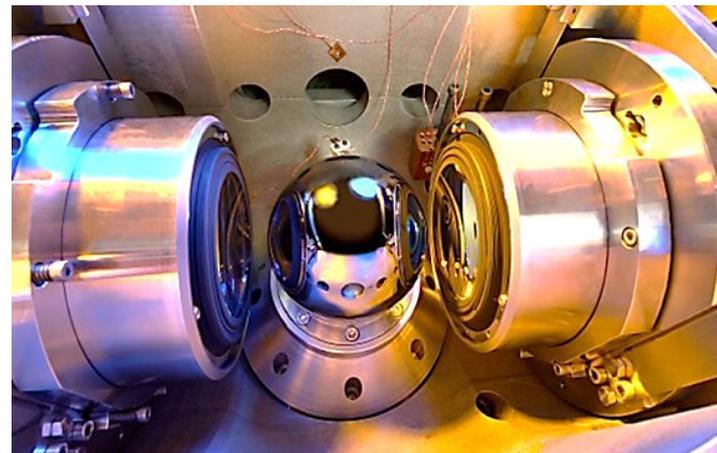
(Note: this text will not come into force until a re-definition of four of the base units of the SI has been agreed by the General Conference on Weights and Measures and takes effect. Certain numerical values are indicated here in blue, because they will not be known until that time.)

### 1. Introduction

This document explains the definition of the mole and how it can be put into practice. The process of putting a definition into practice is often referred to as “realization”, and



determine  $a$



determine  $V_s$

### 2. Realization of the definition of the mole with smallest uncertainty

Currently, the most accurate realization of the definition of the mole results from an experiment that led to the determination of the Avogadro constant. This experiment was carried out in the framework of the International Avogadro Coordination and was fundamental to determining the best experimental values of both the Avogadro and Planck constants prior to fixing their current values. It involved the determination of the number of  $^{28}\text{Si}$  atoms ( $N$ ) in a single crystal of Si enriched in  $^{28}\text{Si}$  using volumetric and X-ray interferometric measurements [1,2] using :

$$N = 8V_s / a(^{28}\text{Si})^3 \quad (2.1)$$

where  $V_s$  is the crystal volume, 8 is the number of atoms per unit cell of crystalline silicon and  $a(^{28}\text{Si})$  is the lattice parameter of the cubic unit cell. Equation 2.1 is strictly only valid for the hypothetical case of a pure  $^{28}\text{Si}$  crystal – hence, all elementary entities in the crystal were identified. This was achieved by determining and correcting for the amount of substance fraction of all impurities (elemental and isotope impurities, i.e.  $^{29}\text{Si}$ ,  $^{30}\text{Si}$ ) with sufficient accuracy [1,2]. This is consistent with the concept for the realization of the kilogram using the X-ray crystal-density (XRCD) approach as described in the *mise en pratique* for the kilogram.



## New SI и кельвин





## *Mise en Pratique (MeP):* практическая реализация

CIPM предусмотрел  
целесообразность *MeP*  
для каждой основной  
единицы при  
переопределении SI

*MeP* должна включать  
**ТОЛЬКО** методы  
реализации **высшего**  
**уровня**

MeP-K > гибкий путь  
расширения диапазона  
термометрических  
методов

### SI Brochure: The International System of Units (SI) [8th edition, 2006; updated in 2014]

List of contents | Download PDF files | *Mises en pratique* | DRAFT 9th edition

→ We are pleased to present the updated (2014) 8th edition of the SI Brochure, which defines and presents the *Système International d'Unités*, the SI (known in English as the International System of Units).

- Preface to the 8th edition

▼ Chapter 1: Introduction

- Quantities and units
- The International System of Units (SI) and the corresponding system of quantities
- Dimensions of quantities
- Coherent units, derived units with special names, and the SI prefixes
- SI units in the framework of general relativity
- Units for quantities that describe biological effects
- Legislation on units
- Historical note

▶ Chapter 2: SI units

▶ Chapter 3: Decimal multiples and submultiples of SI units

▶ Chapter 4: Units outside the SI

▶ Chapter 5: Writing unit symbols and names, and expressing the values of quantities

▶ Appendix 1: Decisions of the CGPM and the CIPM

▶ Appendix 2: Practical realization of the definitions of some important units

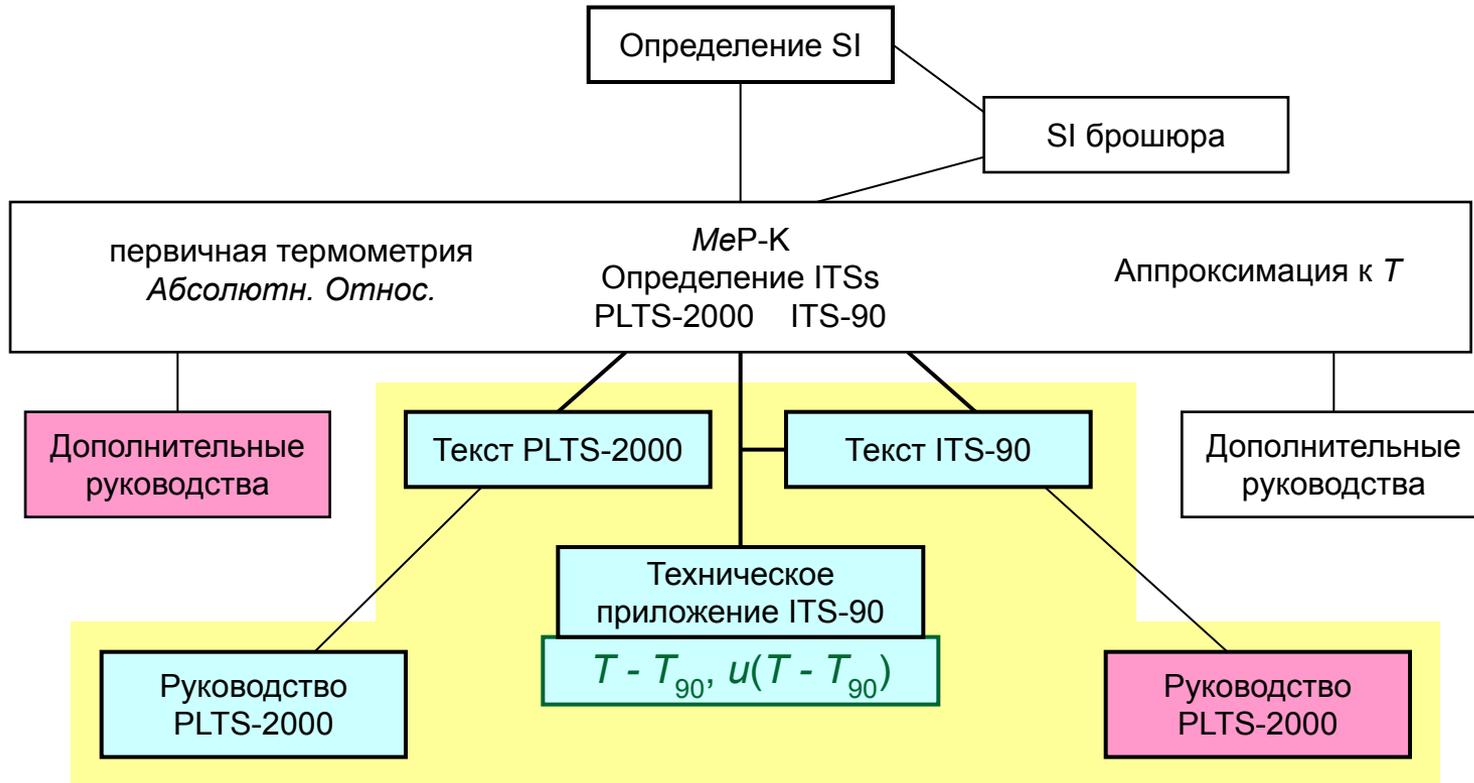
▶ Appendix 3: Units for photochemical and photobiological quantities

- List of acronyms used

Le Système international d'unités  
The International System of Units  
SI



## Связь между *МеР-К* и другими документами



Сплошная рамка: нормативный документ  
Пунктирная рамка: ненормативное руководство

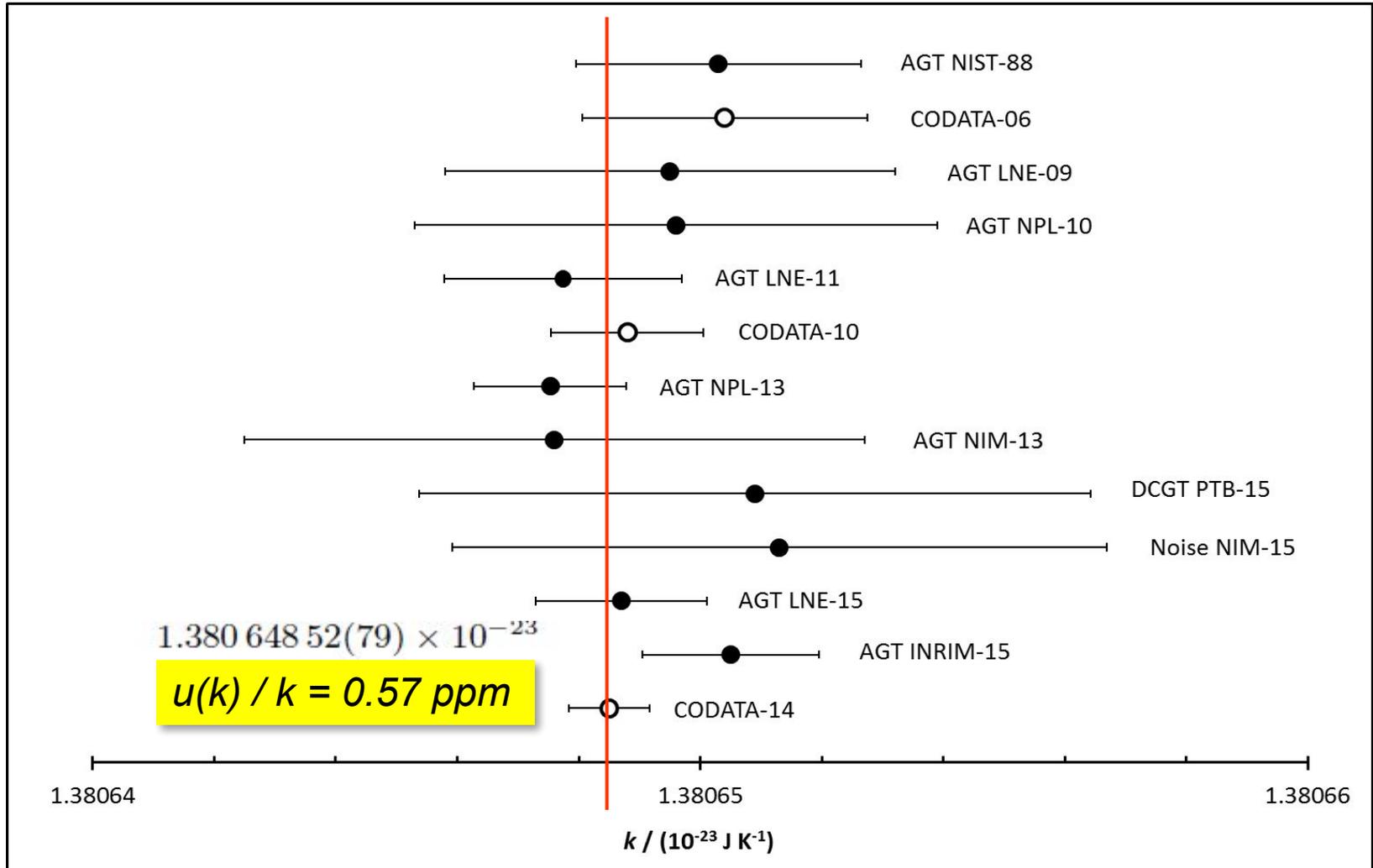
*МеР-К 2011*

На веб-странице ССТ

На стадии подготовки



## Значения $k$ , рассматриваемые CODATA 2014





## New SI и кельвин

### Значения фундаментальных физических констант, рекомендуемые CODATA: 2014\*

Питер Дж. Мохр, Дэвид Б. Ньювел, Барри Н. Тейлор

Национальный Институт стандартов и технологий, Геттисберг, Мериленд 20899-8420, США (30 июня 2015 г.)

Таблица 3. Сокращенный список рекомендуемых CODATA значений фундаментальных физических и химических констант

Показатель	Символ	Численное значение	Единицы	Относ. станд. неопределенность
скорость света в вакууме	$c, c_0$	299 792 458	м с <sup>-1</sup>	точно
магнитная постоянная	$\mu_0$	$4\pi \times 10^{-7} = 12.566\ 370\ 614\dots \times 10^{-7}$	Н <sup>-2</sup>	точно
электрическая постоянная $1/\mu_0 c^2$	$\epsilon_0$	$8.854\ 187\ 817\dots \times 10^{-12}$	Ф м <sup>-1</sup>	точно
гравитационная постоянная	$G$	$6.674\ 08(31) \times 10^{-11}$	м <sup>3</sup> кг <sup>-1</sup> с <sup>-2</sup>	$4.7 \times 10^{-5}$
постоянная Планка	$h$	$6.626\ 070\ 040(81) \times 10^{-34}$	Дж с	$1.2 \times 10^{-8}$
$h/2\pi$	$\hbar$	$1.054\ 571\ 800(13) \times 10^{-34}$	Дж с	$1.2 \times 10^{-8}$
элементарный заряд	$e$	$1.602\ 176\ 6208(98) \times 10^{-19}$	Кл	$6.1 \times 10^{-9}$
Постоянная Ридберга	$R_\infty$	10 973 731.568 508(65)	м <sup>-1</sup>	$5.9 \times 10^{-12}$
Постоянная Авогадро	$N_A, L$	$6.022\ 140\ 857(74) \times 10^{23}$	моль <sup>-1</sup>	$1.2 \times 10^{-8}$
Постоянная Больцмана	$k$	$1.380\ 648\ 52(79) \times 10^{-23}$	Дж К <sup>-1</sup>	$5.7 \times 10^{-7}$
<b>Постоянная Джозефсона</b>	<b><math>K_J</math></b>	<b><math>483\ 597.8525(30) \times 10^9</math></b>	<b>Гц В<sup>-1</sup></b>	<b><math>6.1 \times 10^{-9}</math></b>
Постоянная фон Клитцинга	$R_K$	25 812.807 4555(59)	Ω	$2.3 \times 10^{-10}$



## RECOMMENDATION T1 (2014)

### On a new definition of the kelvin

The Consultative Committee for Thermometry (CCT)

#### recalling

- the CCT Report to the CIPM in 2007, “Report to the CIPM on the implications of changing the definition of the base unit kelvin”;
- the CCT Recommendation to the CIPM in 2010, “Considerations for a new definition of the Kelvin”, CCT T 2 (2010);

#### recommends

that the CIPM request the CODATA to adjust the values of the fundamental physical constants, from which a fixed numerical value of the Boltzmann constant will be adopted, when the following two conditions are met:

1. the relative standard uncertainty of the adjusted value of  $k$  is less than one part in  $10^6$ ; ✓
2. the determination of  $k$  is based on at least two fundamentally different methods, of which at least one result for each shall have a relative standard uncertainty less than 3 parts in  $10^6$ .

**Условие 2 выполнено для АГТ, дополнительные методы: DCGT и шумовая термометрия**



### Использование Si/TEM для реализации метра в нанометрологии

**Рабочая группа по нанометрологии CCL** подготовила проект документа *“Реализация метра системы SI с использованием кремниевой кристаллической решетки и TEM для размерной нанометрологии”*

В этом документе приведены рекомендации по использованию просвечивающей электронной микроскопии (TEM) и эталонного значения постоянной кристаллической решетки монокристаллического кремния как способа прослеживаемости приложений к метру системы SI для применения в размерной нанометрологии

**Обоснование:** реализация метра системы SI через кристаллическую решетку Si может быть более точной и легкой для размерной нанометрологии, чем оптическое разделение интерференционных полос

Будущие пути прослеживаемости через кристаллическую решетку Si, например, рентгеновская интерферометрия, могут понадобиться для расширения реализации метра системы SI до пм-масштаба



# На пути к переопределению секунды

Пространственно-временные измерения

Оптические стандарты времени-частоты

Оптические сети передачи времени-частоты

Новое поколение стандартов для промышленности

Прослеживаемая нанометрология

SIB04  
SRT-s16

SIB02  
SRT-s15  
SRT-r05

IND14

SIB08  
SRT-s03  
SRT-s08  
SRT-s10  
IND17

Проекты

**EMRP**  
European Metrology Research Programme  
Programme of EURAMET



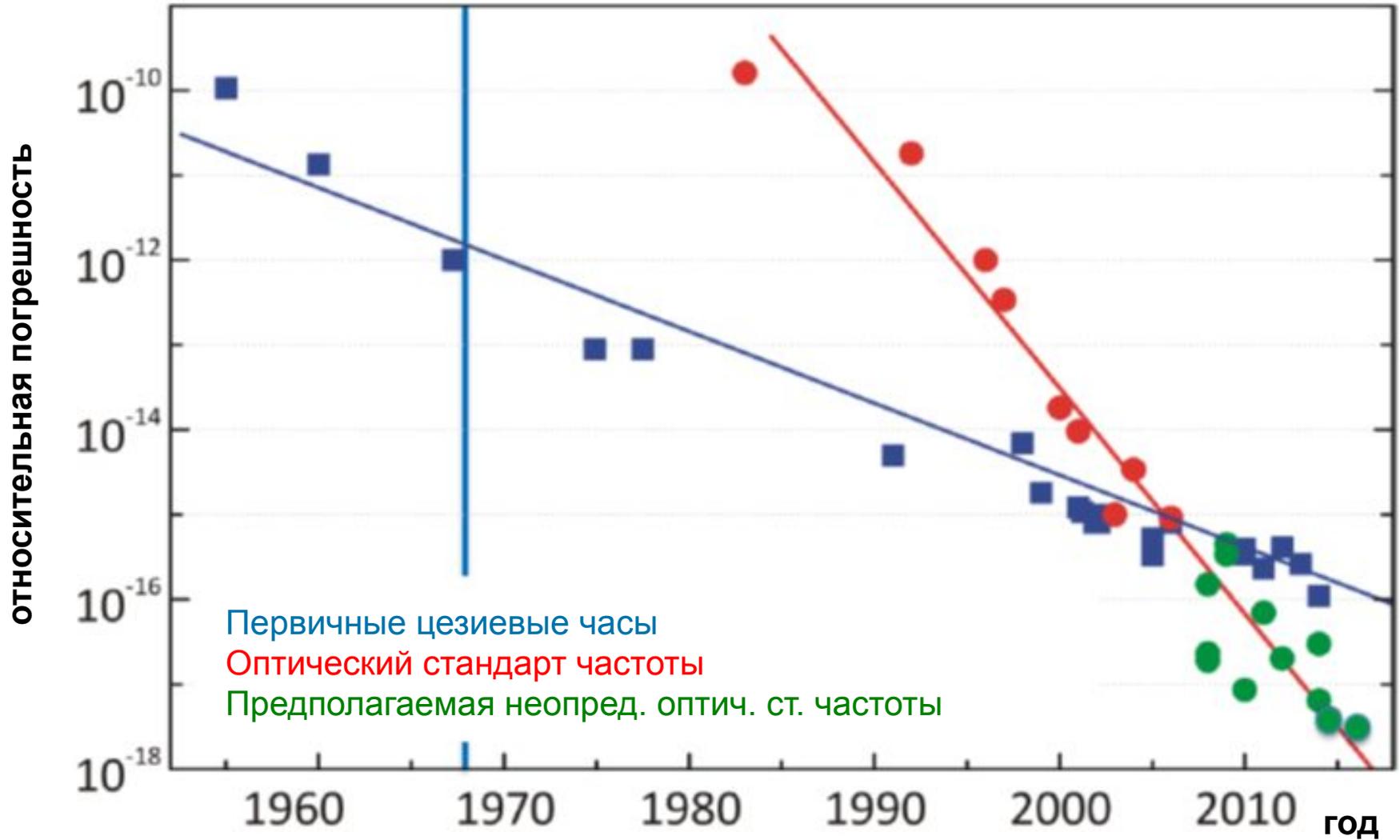
The EMRP is jointly funded by the EMRP participating countries within EURAMET and the European Union

**EMPIR**  

The EMPIR initiative is co-funded by the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme and the EMPIR Participating States



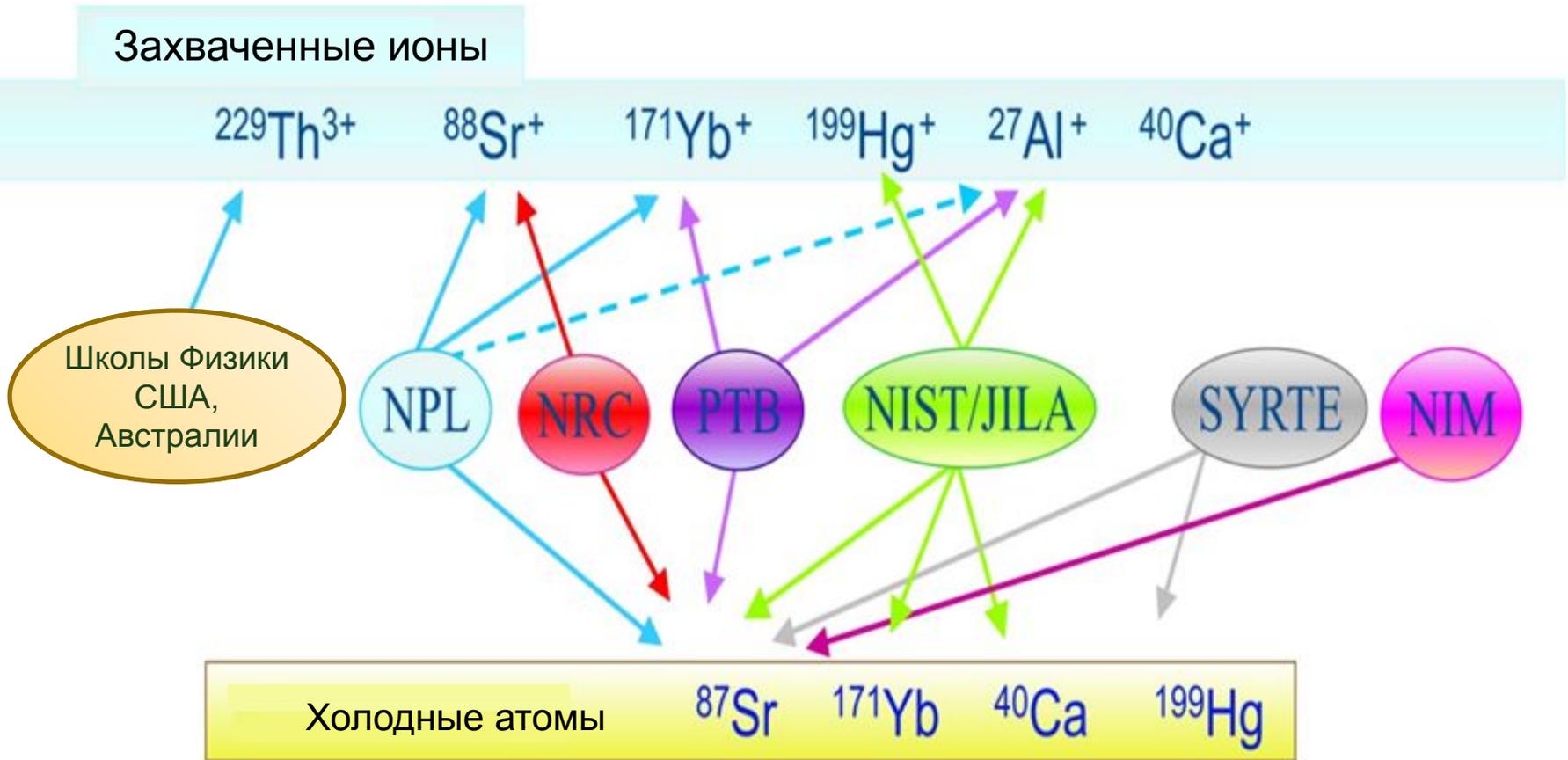
## На пути к переопределению секунды





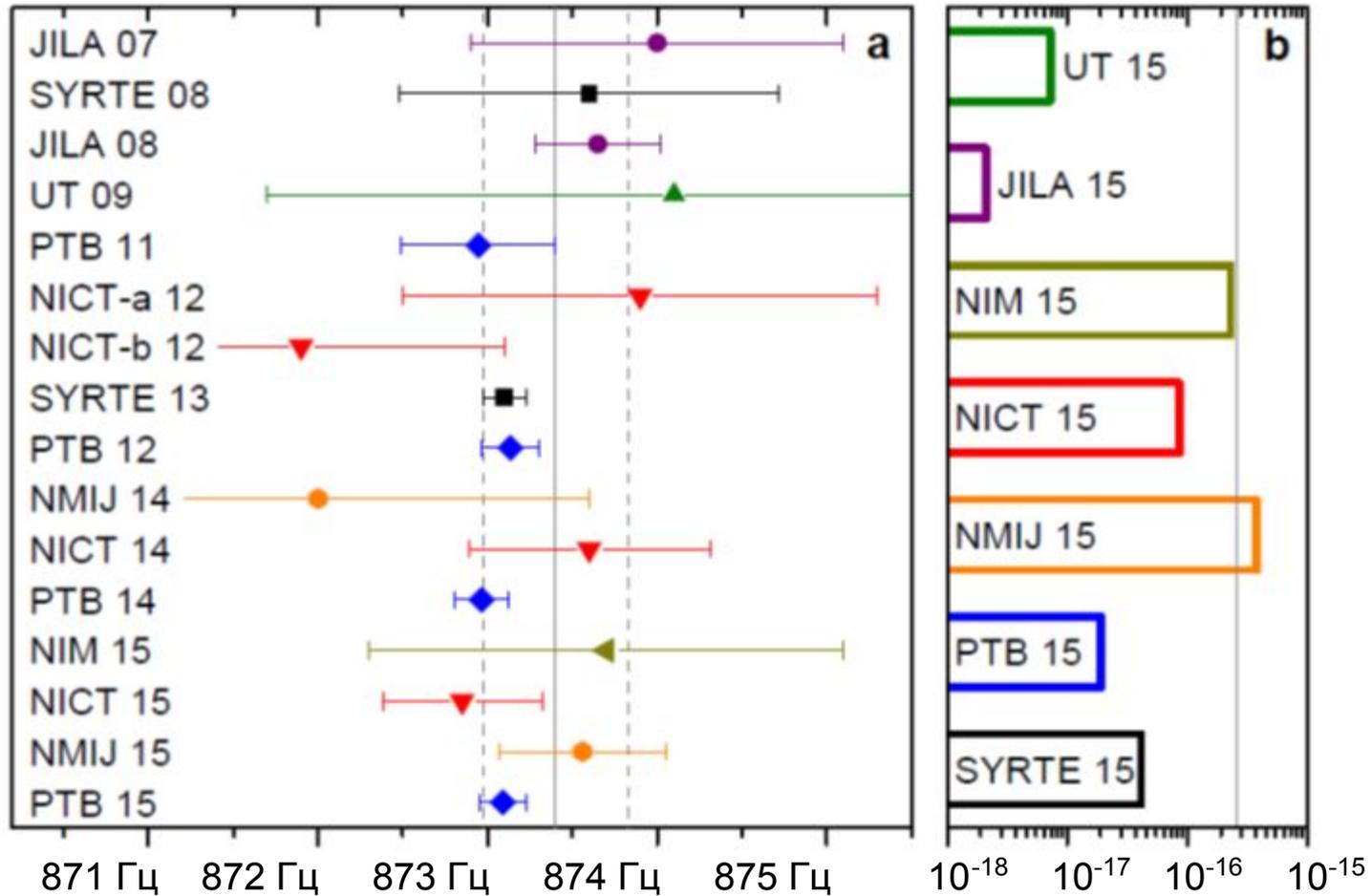
## На пути к переопределению секунды

### Варианты оптического переопределения секунды





## На пути к переопределению секунды



Частота перехода  $429\,228\,004\,229\,000\text{ Гц}$

Систематическая погрешность



## На пути к переопределению секунды

3 замера

$$\Delta v_i / v_i \sim 10^{-8}$$

3 сравнения

$$\Delta(v_i / v_i) < 5 \times 10^{-18}$$

3 замера

$$\Delta v / v < 3 \times 10^{-16}$$

Постоянный вклад в TAI

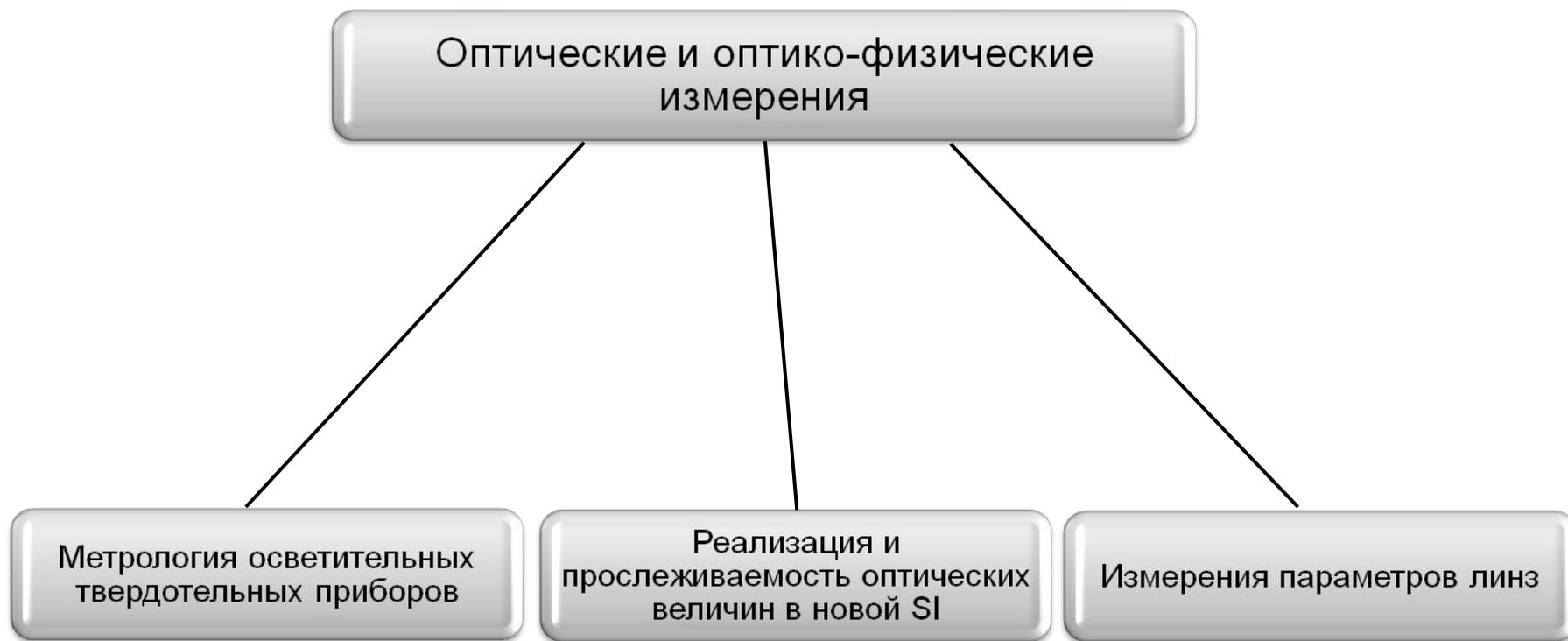
2 сравнения между 5 замерами

$$\Delta(v_i / v_k) / (v_i / v_k) < 5 \times 10^{-18}$$

Проверка и решение по оптическому стандарту

CGPM







В 2015 году **CCPR** доработал

“*Mise en pratique* для определения канделы и связанных с ней производных единиц для фотометрических и радиометрических величин в Международной системе единиц (SI)”

CIPM одобрил этот документ на своем 104-м заседании в 2015 г.

(Решение CIPM/104-45)

На данный момент находится в свободном доступе в разделе SI на BIPM HP

[http://www.bipm.org/utils/en/pdf/SIApp2\\_cd\\_en.pdf](http://www.bipm.org/utils/en/pdf/SIApp2_cd_en.pdf)

Совместная WG CCPR и CIE готовит более расширенную публикацию

“**Основные принципы фотометрии**”



### **Деятельность ССРР связана с физиологическими величинами.**

Отсутствуют какие-либо особые требования или мнения, которые необходимо включить в описание физиологических величин в следующей версии Брошюры SI.

### **Соответствующее содержание проекта 9-й Брошюры SI полностью согласуется с соглашениями и рекомендациями ССРР.**

#### Примечание

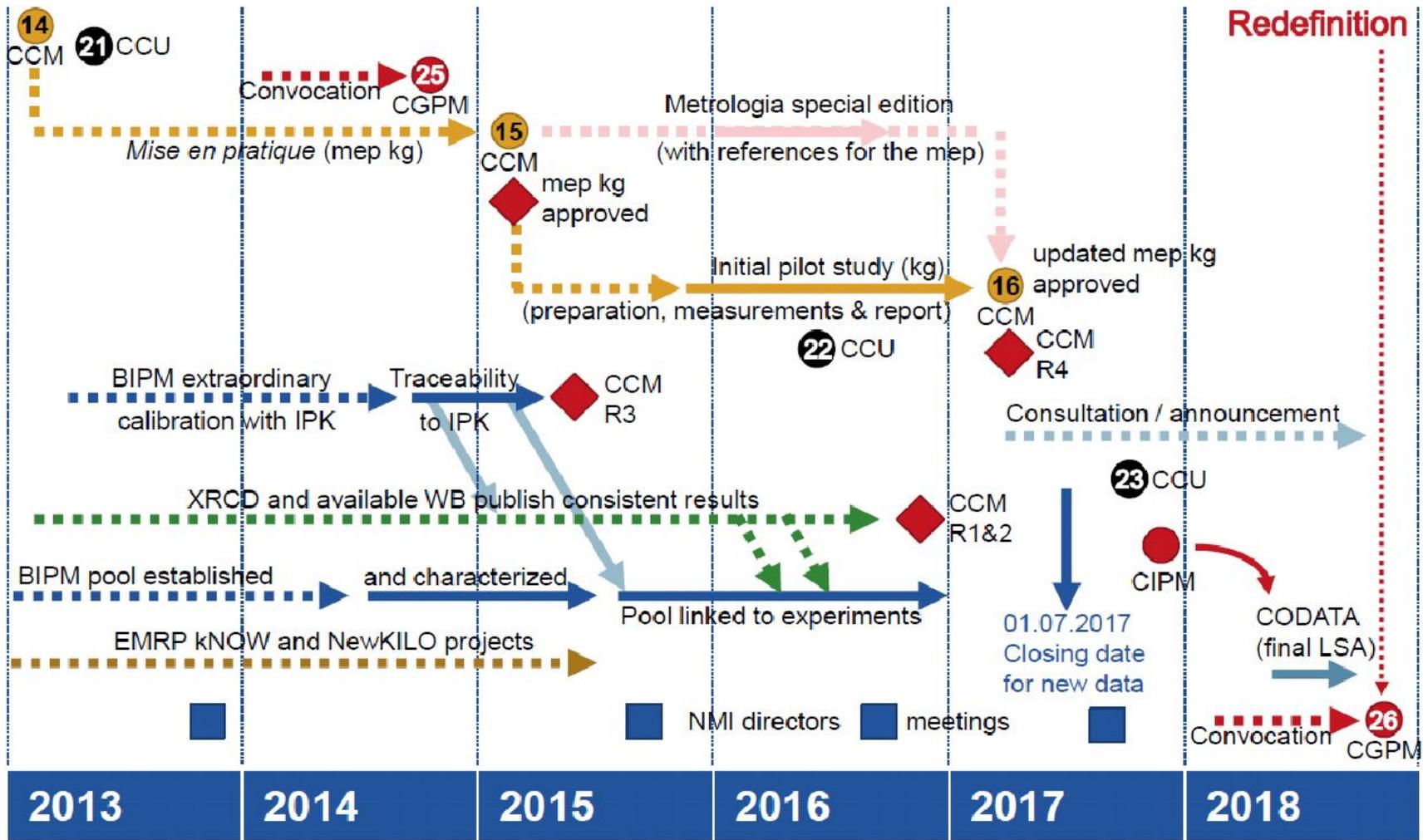
В проект стандарта CEN (2014) были внесены новые изобретенные единицы невизуальных эффектов света (касающиеся определенного человеческого пигмента, ...). Это будет контролироваться и обсуждаться ССРР.

### **Соглашения и рекомендации прошедшего заседания ССРР**

**Переход от канделы к люмену** не несет никакой реальной практической пользы, напротив, приведет к тому, что геометрические аспекты фотометрии станут скрытыми. В отсутствии убедительных причин для перехода от канделы к люмену в качестве основной единицы SI настоятельно рекомендуется сохранить статус-кво.



# Дорожная карта



◆ Условия из Рекомендации G1 CCM (2013)



- **Терагерцевая метрология**
- **Квантовые вычисления (квантовые биты-кубиты)**
- **Нанобиоэлектроника**
- **Молекулярная электроника**
- **Наноразмерная СВЧ-метрология и спинтроника**
- **Наномагнетизм**



## Новые проблемы в метрологии

---

### **Нанобиоэлектроника:**

анализ ДНК и других цепных молекул, контроль клеточной микросреды, биотехнологические вычисления

### **Молекулярная электроника:**

одномолекулярные и внутренне-молекулярные измерения, одномолекулярные пленки на основе самосборок

### **Наноразмерная СВЧ-метрология и спинтроника**

### **Наномагнетизм:**

магнитно-силовая и сканирующе-туннельная микроскопия

### **Квантовые вычисления:**

(квантовые биты – кубиты): высокоскоростные коммуникации и вычислительные системы, их метрологическое обеспечение

**Терагерцевая метрология:** ультраскоростные беспроводные коммуникации и зондирование, спектроскопия (метрология полностью отсутствует)

### **Трехмерная нанометрология и прослеживаемая субнанометрология**

(метрология этих отраслей в начальном состоянии)



## Электрические измерения

**Ампер** реализован на базе метода одноэлектронного туннелирования,  $u \sim 1 \cdot 10^{-7}$

**Вольт** и **Ом** реализованы на квантовых эффектах **Джозефсона** и **Холла**, замкнутый “квантовый треугольник”

Реализованы измерения параметров переменного тока (на частоте до 1 МГц) на базе эффекта **Джозефсона**,  $u \sim 1 \cdot 10^{-6}$

Реализованы единицы параметров электрических цепей – **ома**, **фарада**, **генри**, на базе квантового эффекта **Холла** на переменном токе

Усовершенствованы технологии реализации квантовых эффектов, что позволило создавать **коммерческие средства измерительной техники** с принципиально новыми метрологическими характеристиками

## Пространство и время

**Секунда** определяется через частоту квантового явления в **оптическом** диапазоне частот, неопределенность реализации  $u \sim 10^{-18}$

**Метр** определяется через скорость света, неопределенность реализации  $u \sim 10^{-14}$

Достигнут необходимый уровень прослеживаемости в **нанометрии**



### Масса и связанные единицы

Килограмм определяется через постоянную Планка, неопределенность  $(1\sim 2) \cdot 10^{-9}$

### Температурные и тепловые измерения

Кельвин определяется через постоянную Больцмана

Вырос уровень и доступность первичной термометрии, **шкала МТШ-90** постепенно **теряет свое значение** единой опоры температурных измерений

Эталоны МТШ-90 стали вторичными

### Радиометрия и фотометрия

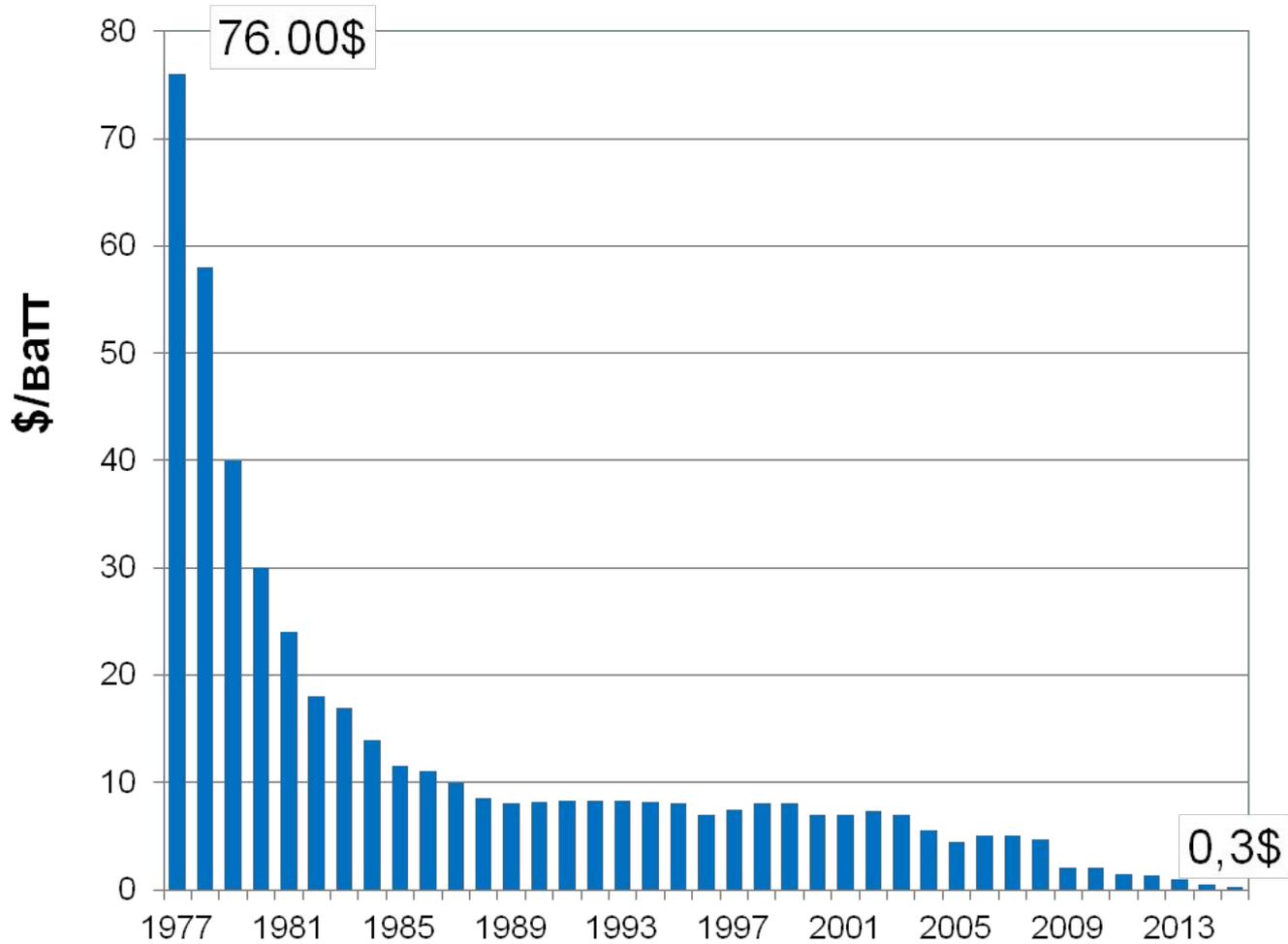
Достигнуты значительные **успехи в однофотонных технологиях**

Фотометрические единицы определяются в терминах квантовых единиц и прослеживаются к постоянной Планка

**Криогенный радиометр** сохраняет свое значение метрологического базиса оптико-физических измерений



## Ценовая политика кремниевых элементов питания в USD за ватт



Источник: Bloomberg New Energy Finance и [pv.energytrend.com](http://pv.energytrend.com)



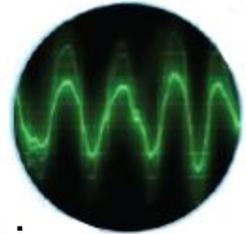
## Измерения Smart Grid

**Общая цель:** развивать, демонстрировать и утверждать новые измерительные инструменты для сетевой операционной стабильности (эксплуатационной устойчивости) и качества электроэнергии

**Поддержка стабильности и качества источника питания (RES)**



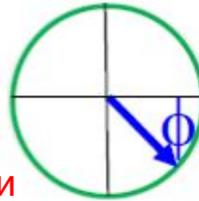
1. **“Радар”** для контроля качества электроэнергии – для определения точного местонахождения плохих источников питания с целью недопущения негативных последствий и контроля соблюдения.



2. **Модуль управления электропитанием (PMU)** – прослеживаемость; измерения на местах – «контроль жизнеобеспечения» для Smart Grid

3. **Импеданс Grid** с использованием гармонизованных данных

4. Преобразователи – **неинвазивные** (дистанционные), играющие важную роль в подключении PQA, PMU к Grid



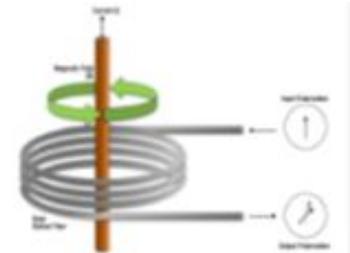
Исследование института Леонардо: “Расходы на контроль качества электроэнергии в Европе имели экономическое влияние, превышающее 150 млрд./год”



**Общая цель:** перспективные измерительные технологии для энергосистем будущего.

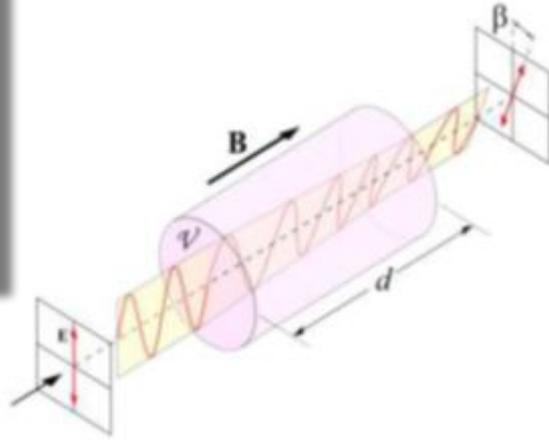
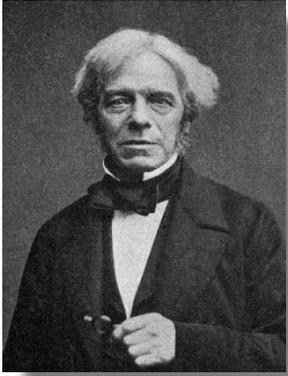
Разработка, оценка характеристик и калибровка новых широкополосных датчиков:

1. Метрологические оптические токоизмерительные датчики
  - **базируются на эффекте Фарадея**
2. Новейшие сенсорные технологии
  - **улучшенная катушка Роговского**, делитель напряжения для гармоник MV (низкого напряжения) Grid
3. Разработка методов калибровки
  - ток и напряжение с цифровым или нестандартным аналоговым выходом
  - коммерческие “тестовые наборы”

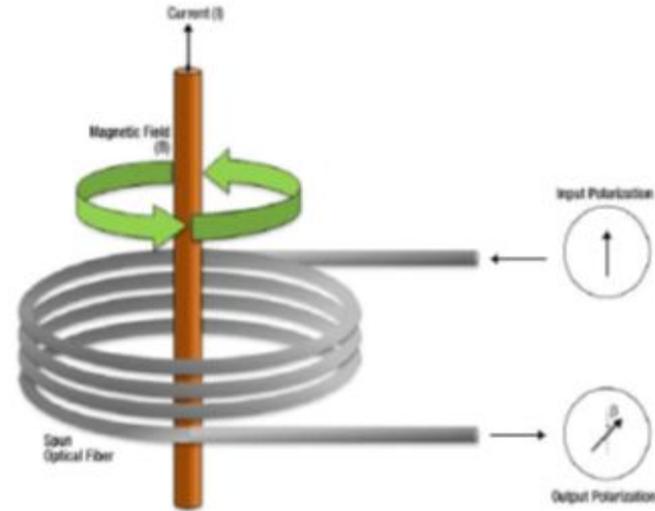




# Оптический эффект Фарадея



$$\beta \sim VBd$$



$$\beta \sim NVI$$

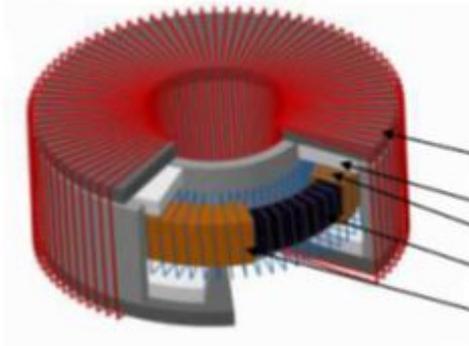
$V$  - Постоянная Верде

- **Преимущество:** линейность, широкополосность, низкий вес, простота изоляции  
Цифровой выход → простая интеграция цифровых подстанций
- **Задача:** чувствительность, точность (Т эффект), дорогостоящее считывание данных



# Новые датчики тока и напряжения

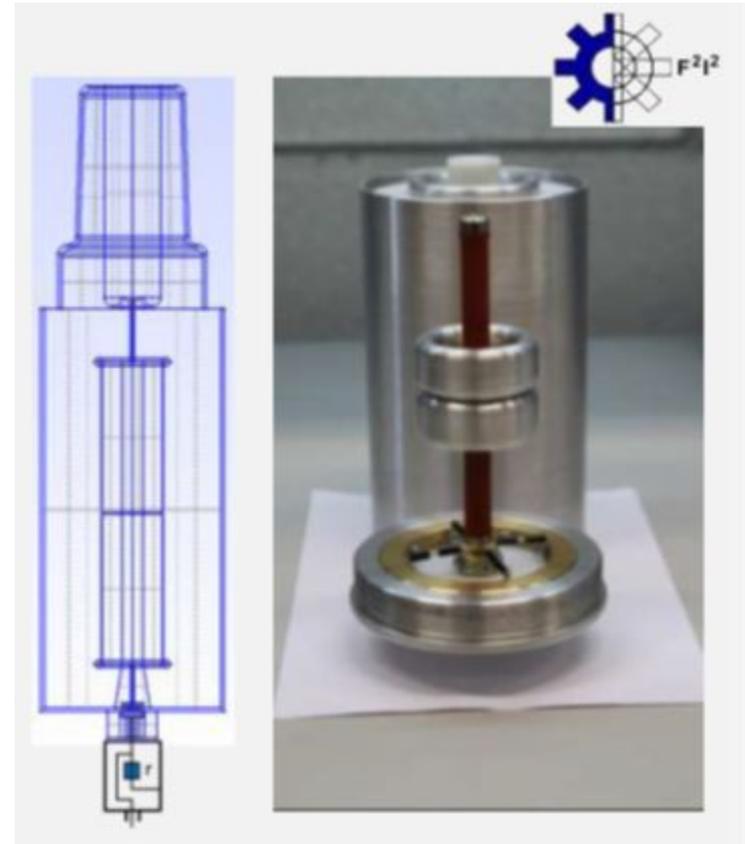
## Закрытая катушка Роговского



- Внешняя обмотка
- Магнитный экран
- Внутренняя обмотка
- Катушка Роговского
- Внутренняя коробка



## Широкополосный MV (низковольтный) датчик напряжения





## Общая цель для электротехнической области:

подтвердить качество продукции, разработанной для более высокой эффективности в электрических сетях (т.е. для более высокого сетевого напряжения с меньшими потерями)

**поддержка ведущей европейской HV промышленности**

1. Ультравысокий электрический импульс
  - обеспечение качества и надежности высоковольтного оборудования
2. Очень быстрые импульсы
  - обеспечение совместимости проверки
3. Потери оборудования на переменном токе
  - поддержка директивы Eco-Design
  - обеспечение базы для оценки эффективности оборудования
4. Местные высоковольтные потери на постоянном токе
  - разработать базу для определения способности преобразования AC/DC



SIEMENS





# ВЫВОДЫ

**EMRP**

European Metrology Research Programme  
Programme of EURAMET

The EMRP is jointly funded by the EMRP participating countries within EURAMET and the European Union



**EMPIR**



**EURAMET**

The EMPIR initiative is co-funded by the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme and the EMPIR Participating States

Электрические сети являются ключевой инфраструктурой нашего общества, сталкивающиеся со значимыми проблемами (Энергетический переходный период)

**Метрология может сделать существенный вклад для поддержки качества и безопасности электроснабжения и обеспечить более высокую эффективность**



- Снятие показаний: лучшие измерительные места, определение и прогнозирование состояния сети
- Измерения Smart Grid: PMU (модули управления электропитанием) на местах и кампания повышения качества электроэнергии
- Новые датчики: оптические и усовершенствованные существующие технологии
- Промышленность высокого напряжения: поддержка лучшей эффективности



**Спасибо за внимание!**



Генеральный директор  
д.т.н., проф. П.И. Неежмаков

[pavel.neyezhnikov@metrology.kharkov.ua](mailto:pavel.neyezhnikov@metrology.kharkov.ua)