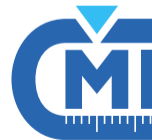


# Metrologie a revize SI

od artefaktů ke kvantovým etalonům

Martin Šíra

Český Metrologický Institut



Co je to návaznost?

Návaznosti dnes

System SI

Proč a jak revize SI

Revize SI

## Návaznost

Určuje vztah měření nebo hodnoty etalonu k národním etalonům prostřednictvím nepřerušného řetězce porovnání s uvedením příslušných nejistot.

Návaznost zajišťuje, že výsledek měření nebo hodnota etalonu jsou vztaženy k referencím vyšší úrovně, nakonec až k primárním etalonům.

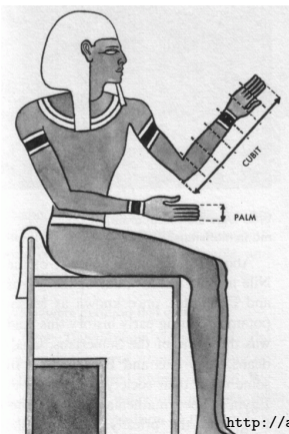
Primární etalony realizují veličinu podle systému jednotek: SI.

# Již staří egypťané, 3000 l.p.n.l

Návaznost délkových měřidel (loket – cubit) na jeden „zlatý etalon“.

Každý měsíc porovnání.

Opomenutí se trestalo stětím hlavy!



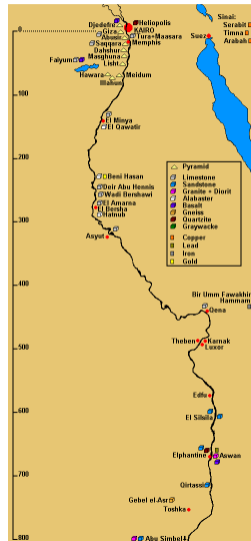
Uriah Wellcome: Coudée (règle) de Mâya, ministre des Finances du roi  
Toutânkhamon, 1336 – 1327 a.v. J.-C. (18<sup>e</sup> dynastie)

# Kamenné lomy v historickém egyptě

## Velká pyramida v Gíze



- ▶ Základ pyramidy z vápence na místě stavby
- ▶ Povrch pyramidy z Tury
- ▶ Pohřební místost z granitu z Asuánu



## Veřejné míry na branách měst

Průzkumem zjištěno:

- ▶ 37 místních variací stopy
- ▶ 68 variací lokte
- ▶ 83 různých měr pro suché zrní
- ▶ 70 pro tekutiny
- ▶ 63 pro váhy

Příklad z Greenwiche:



Co je to návaznost?

**Návaznosti dnes**

System SI

Proč a jak revize SI

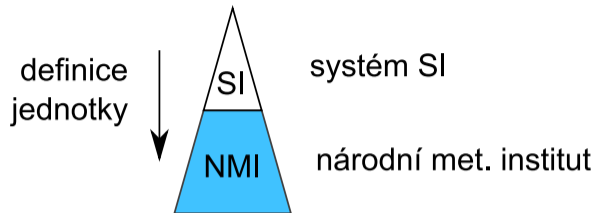
Revize SI

1. horizontální – CIPM MRA
2. vertikální – CIPM MRA
3. jednotková – systém SI

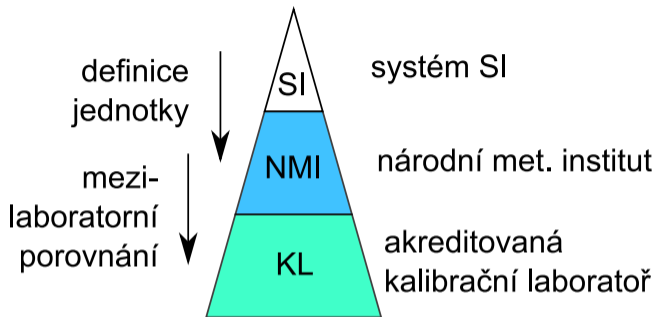




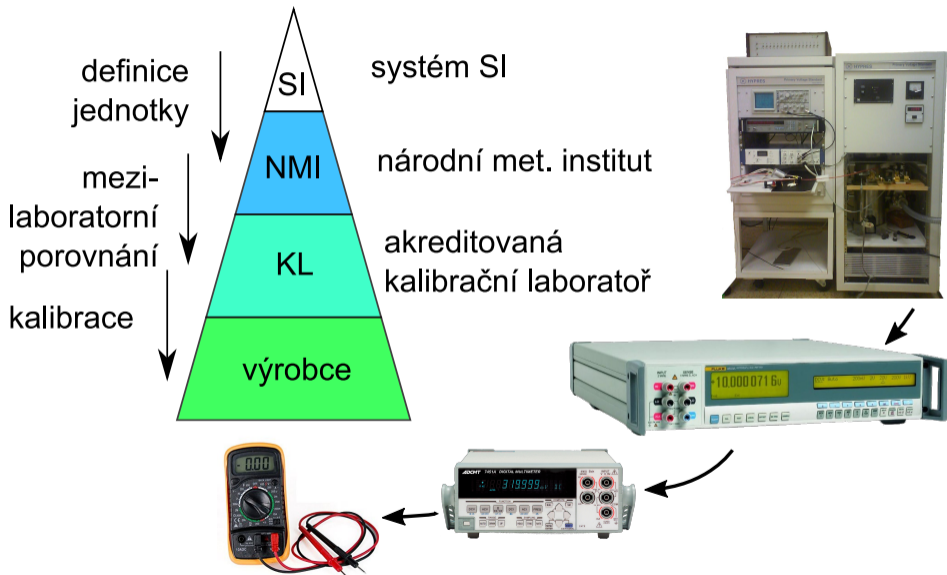
# Vertikální návaznost: SI a NMI



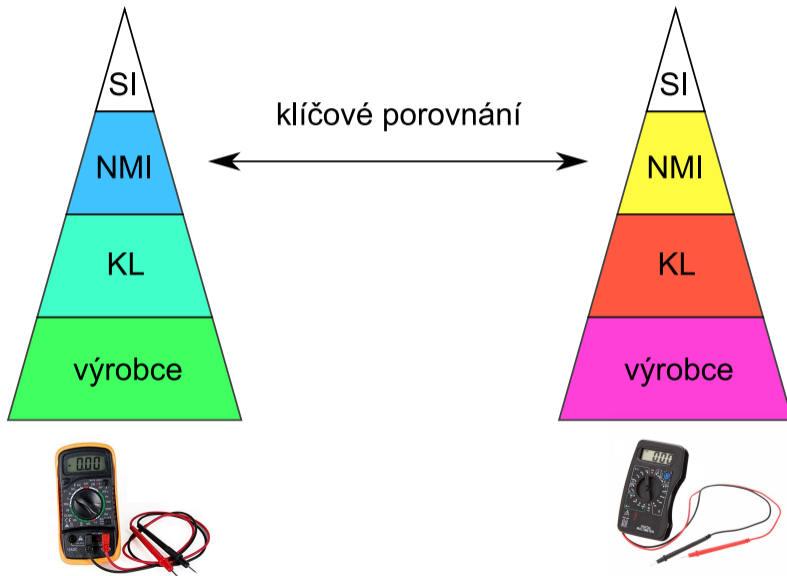
# Vertikální návaznost: kalibrační laboratoře



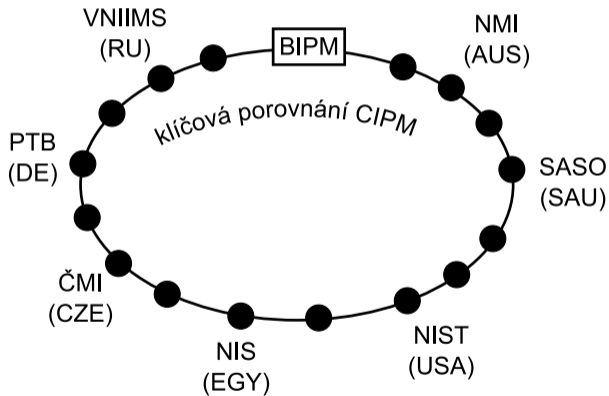
# Vertikální návaznost: výrobci



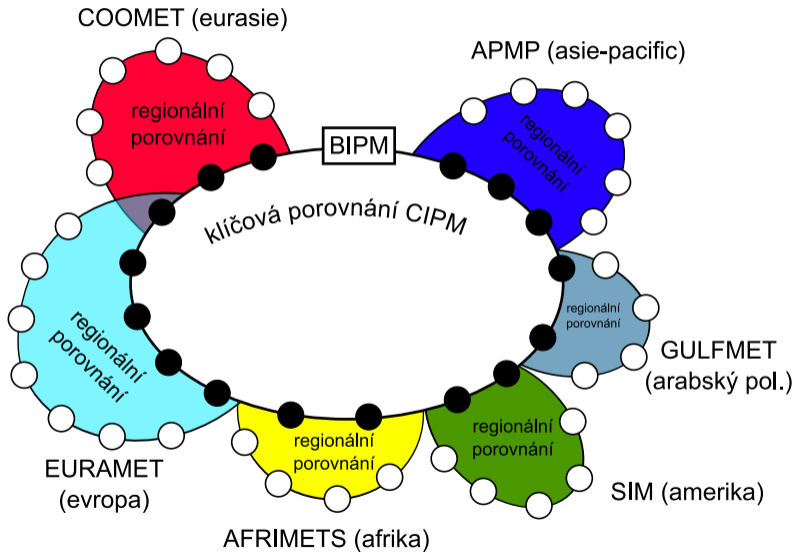
# Horizontální návaznost



# Horizontální návaznost NMI



# Horizontální návaznost NMI



# Příklad návaznosti: kalibrační list zákaznického přístroje



**Český metrologický institut**

Okružní 31, 638 00 Brno

tel. +420 545 555 111

www.cmi.cz



**Kalibrační laboratoř č. 2202 akreditovaná Českým institutem pro akreditaci, o.p.s.  
podle ČSN EN ISO/IEC 17025:2005**

**Pracoviště:**

Oblastní inspektorát Brno, Okružní 31, 638 00 Brno

Oddělení primární etalonáže ss a nf elektrických veličin, tel.: +420 545 555 208,

fax +420 545 555 183

## KALIBRAČNÍ LIST

**6011-KL-L0107-19**

**KALIBRAČNÍ LIST**

**6011-KL-L0107-19**

**List 2 z(e) 10 listů**

**Použité etalony:**

Kalibrátor Fluke 5730A, v.č. 2843501, kalibrační list 6011-KL-E0005-19.

Čítač Pendulum CNT-81, v.č. SM783671, kalibrační list 6011-KL-E0025-18.

Etalon elektr. odporu Mikroprovd R 4030 1 GΩ, v.č. 0006, kal.list č. 1011-

KL-00068-17. Další použité etalony: Zdroj signálu Hewlett-Packard 33120A,

v.č. US34010167.

Všechny použité etalony mají návaznost na (mezi)národní etalony.

# Příklad návaznosti: kalibrační list etalonu ČMI



Český metrologický institut

Okružní 31, 638 00 Brno

tel. +420 545 555 111, fax +420 545 222 728, www.cmi.cz



**Pracoviště:** Oblastní inspektorát Praha, Radiová 1136/3, 102 00 Praha 10  
Oddělení primární metrologie el. odporu, tel. +420 266 020 117, fax. +420 266 020 169

## KALIBRAČNÍ LIST

1011-KL-20050-17

Tento kalibrační list je v souladu s kalibračními schopnostmi měření (CMCs), které jsou uvedeny v příloze C Ujednání o vzájemném uznávání (MRA) vydaného Mezinárodním výborem pro míry a váhy (CIPM). Podle tohoto Ujednání všechny zúčastněné instituty vzájemně uznávají platnost svých kalibračních listů pro veličiny, rozsahy a nejistoty měření uvedené v příloze C (podrobnosti viz [www.bipm.org](http://www.bipm.org)).

**Datum vystavení:** 17. května 2017

List 1 ze 2 listů

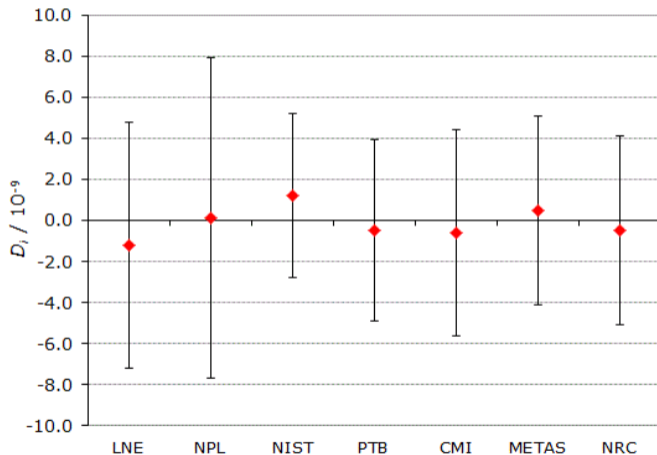
Kalibrace etalonu elektrického odporu byla provedena podle pracovního postupu č.111-MP-C001.

Referenční etalon ss elektrického odporu má návaznost na státní etalon ss elektrického odporu na bázi KHJ a je vztažen k doporučené hodnotě von Klitzingovy konstanty  $R_{K-90} = 25\,812,807\ \Omega$ .



# Výsledky klíčového porovnání odporů: BIPM.EM-K12

Poměr odporu k odporu kvantové struktury, nominální hodnota  $100 \Omega / R_H(2)$



$D_i$ : stupeň ekvivalence s rozšířenou nejistotou  $U_i$  ( $k = 2$ ), <https://kcdb.bipm.org>

Co je to návaznost?

Návaznosti dnes

**System SI**

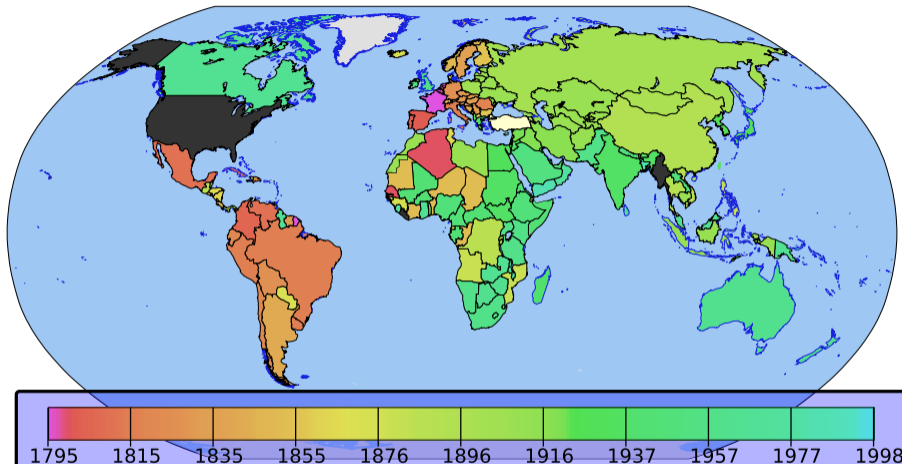
Proč a jak revize SI

Revize SI

# Krátká historie SI

- ▶ 1790 – začátek vývoje metrického systému v Academié des sciences
- ▶ 1875 – Metrická konvence
- ▶ 1889 – prototyp kilogramu a metru
- ▶ 1893 – Michelson zmiňuje možnou definici metru pomocí záření
- ▶ 1913 – mezinárodní teplotní škála
- ▶ 1948 – rozhodnutí o „SI“, zavedení pojmů ampér, bar, coulomb, farad, Henry, Joule, Newton, ohm, volt, watt, weber, °C.
- ▶ 1954 – šest základních jednotek „SI“, kelvin
- ▶ 1960 – definice metru jako násobek vlnové délky světla
- ▶ 1967 – definice sekundy podle záření Cs 133
- ▶ 1971 – zavedení molu
- ▶ 1983 – metr předefinován podle rychlosti světla
- ▶ 1990 – konvenční hodnoty Josephsonovy a von Klitzingovy konstanty
- ▶ 2011 – návrh revize SI
- ▶ 2018 – revize SI

# Země podle data přijetí SI – úspěšný projekt



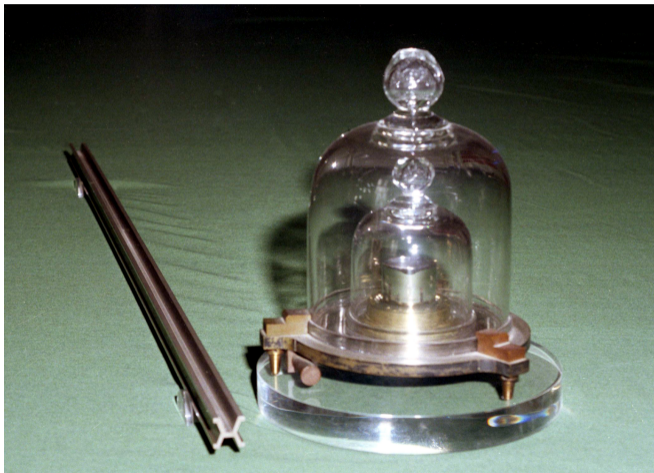
Zaostalé země: USA, Libérie, Myanmar, Nezávislý stát Samoa, Federativní státy Mikronésie, Republika Palau, Marshallovy ostrovy.

H. Vera, 'The Social Life of Measures Metrication in the United States and Mexico', New School University, New York, N.Y., USA, 2012.

- ▶ decimální
- ▶ jednotky a díly  
*např.  $\mu\text{m}$ ,  $\text{mm}$ ,  $\text{m}$ ,  $\text{km}$ ,  $\text{Mm}$*
- ▶ vzájemná souvislost  
*např.  $1 \text{ dm}^3 \equiv 1 \text{ kg vody}$   
(dnes už jen  $1 \text{ dm}^3 \approx 1 \text{ kg}$ )*
- ▶ základní a vedlejší jednotky  
*základní:  $\text{m}$ ,  $\text{kg}$ ,  $\text{s}$ ,  $\text{A}$ ,  $\text{K}$ ,  $\text{mol}$ ,  $\text{cd}$   
vedlejší:  $\text{rad}$ ,  $\text{Hz}$ ,  $\text{V}$ ,  $\text{N}$ ,  $\text{Pa}$ , aj.*
- ▶ praktická  
*Koupit si ( $1,1 \times 10^{29} m_e$  salámu) nebo ( $100 \text{ g}$  salámu)*
- ▶ definice jednotek a jejich fyzické realizace  
*např. mezinárodní prototyp kilogramu*

# Mezinárodní prototyp metru a kilogramu

Jediný pravý  
metr do  
roku 1960



Jediný pravý  
kilogram do  
roku 2019

- ▶ sekunda – přírodní jev  
*Cs hodiny*
- ▶ metr – hodnota konstanty  $c$
- ▶ kilogram – **artefakt**  
*International Prototype of Kilogram, IPK*
- ▶ ampér – odvozeno od síly  
*pro praktické použití odvozeno od  $e$ ,  $h$  pomocí **dohodnutých hodnot z r. 1990***
- ▶ kelvin – přírodní jev  
**trojný bod vody**
- ▶ candela – hodnota konstanty  $K_{cd}$
- ▶ mol – vážení látky

Co je to návaznost?

Návaznosti dnes

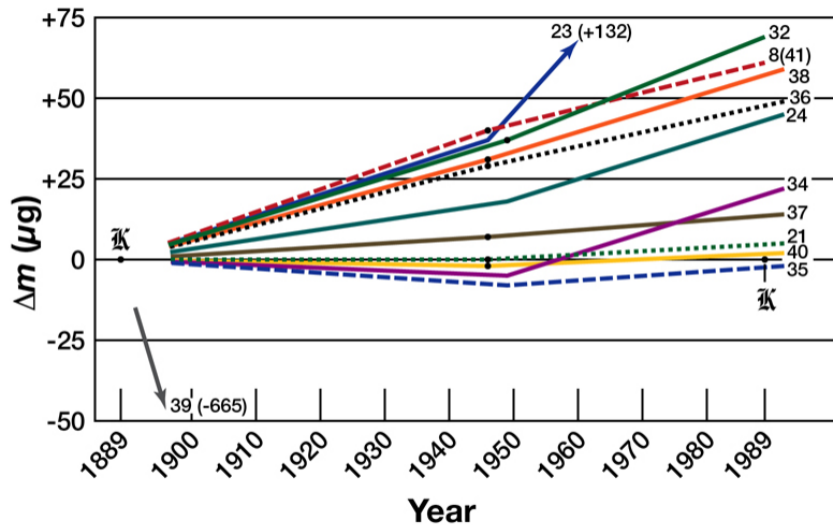
System SI

**Proč a jak revize SI**

Revize SI



# Stabilita IPK



Hmotnost národních etalonů K21 – K40 a sesterských kopií IPK K32 a K8.

# Proč revize SI?

- ▶ IPK je poslední artefakt v SI
- ▶ měření malých hmotností má velkou nejistotu
- ▶ elektrické veličiny jsou používány mimo SI (protože nejistoty  $h$  a  $e$  v SI jsou příliš velké)
- ▶ definice K je závislá na vlastnostech vody (čistotě, okolních podmínkách)
- ▶ mol je závislý na kg
- ▶ nestabilita IPK (IPK (asi) ztrácí svou hmotnost)

# Proč revize SI?

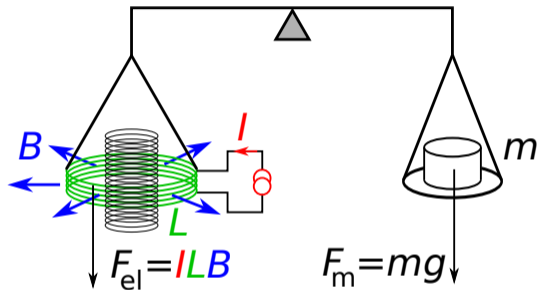
- ▶ IPK je poslední artefakt v SI → lze navázat kg na konstanty?
- ▶ měření malých hmotností má velkou nejistotu
- ▶ elektrické veličiny jsou používány mimo SI (protože nejistoty  $h$  a  $e$  v SI jsou příliš velké)
- ▶ definice K je závislá na vlastnostech vody → lze navázat K na konstanty? (čistotě, okolních podmínkách)
- ▶ mol je závislý na kg → lze mol oprostít od návaznosti na kg?
- ▶ nestabilita IPK (IPK (asi) ztrácí svou hmotnost)

Jak navázat makroskopickou hmotnost (kg) na konstanty ( $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ ,  $c$ ,  $h$ )?  
(ve staré SI to znamená změření  $h$  pomocí IPK – zachování kontinuity staré a nové SI)

- ▶ **Kibblovy váhy.**  
Elektrické váhy.
- ▶ **projekt Avogadro.**  
Počítání atomů v křemíkové kouli
- ▶ Počítání a akumulování iontů kovu neutralizovaných proudem.  
Příliš pomalé.
- ▶ další...

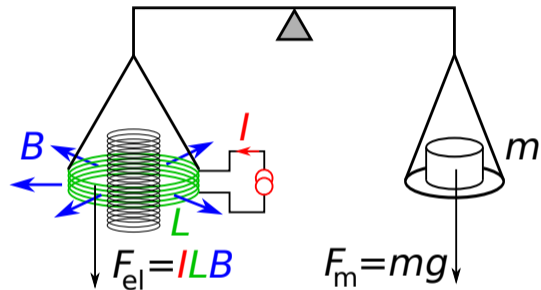
# Kibblovy váhy

vážení: statické měření

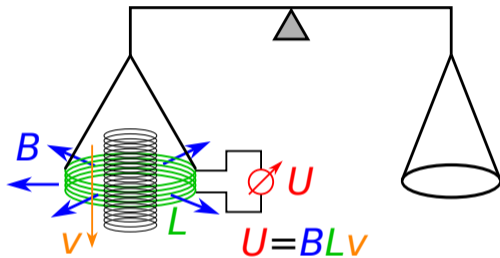


# Kibblovy váhy

vážení: statické měření

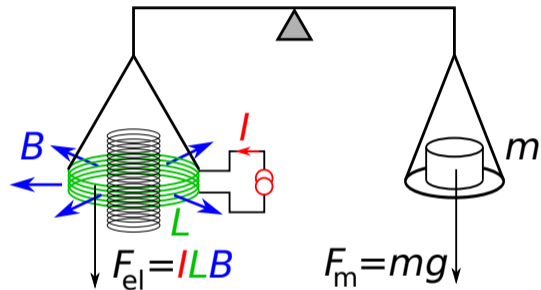


měření vlastností cívky: dynamické měření

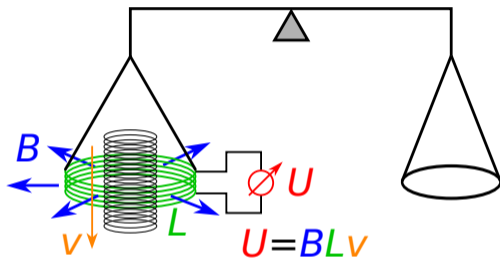


# Kibblovy váhy

vážení: statické měření



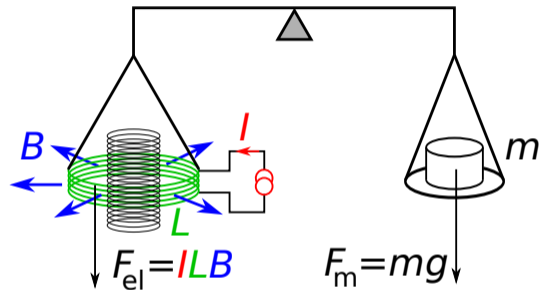
měření vlastností cívky: dynamické měření



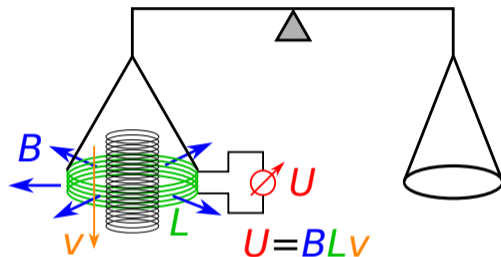
$$mgv = UI = U^2/R$$

# Kibblovy váhy

vážení: statické měření



měření vlastností cívky: dynamické měření



$$mgv = UI = U^2/R$$

Josephsonův jev:  $U = f(\Delta\nu_{Cs}, h, e)$

kvantový Hallův jev:  $R = f(h, e^2)$

tíhové zrychlení:  $g = f(\Delta\nu_{Cs}, c)$

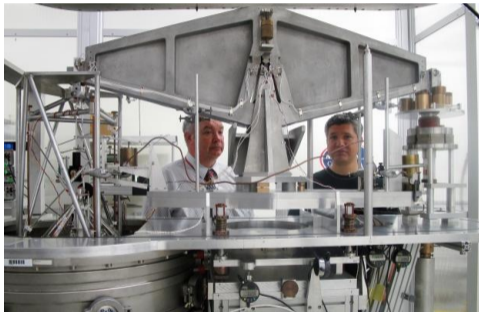
rychlost:  $v = f(\Delta\nu_{Cs}, c)$

$\Rightarrow$

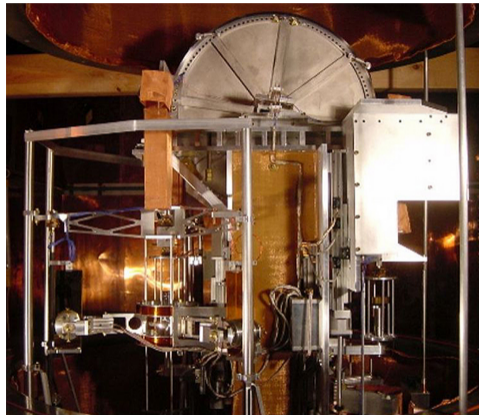
$$m = f(\Delta\nu_{Cs}, c, h)$$



# Kibblovy váhy



projekt NPL (VB)



projekt NIST (USA)

# projekt Avogadro

- ▶ Mezinárodní projekt.
- ▶ Několik vyrobených Si koulí.
- ▶ Měření mřížkové konstanty rentgenovou difrakcí.
- ▶ Měření topografie optickou interferometrií.
- ▶ Měření izotopového složení hmotnostní spektroskopií.

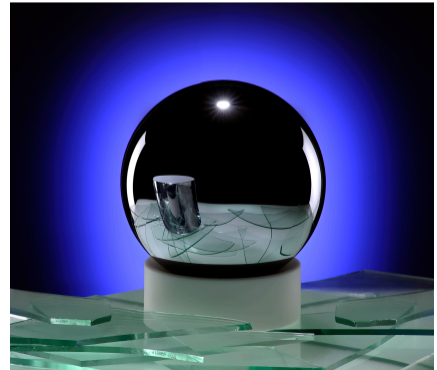


# projekt Avogadro

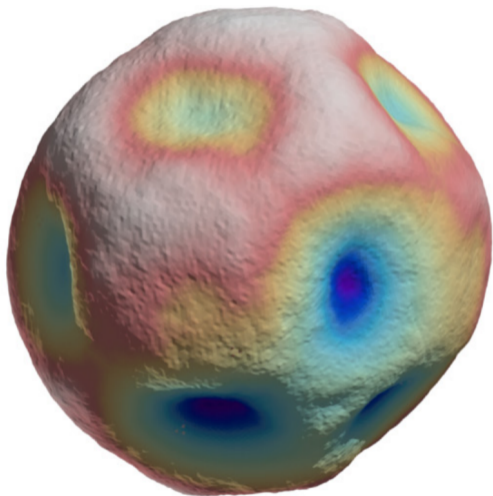
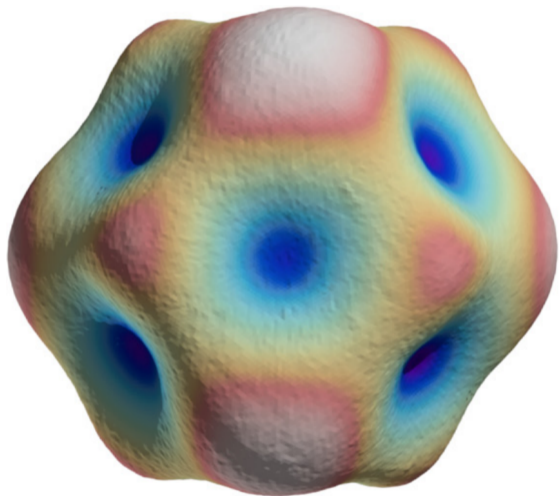
- ▶ Mezinárodní projekt.
- ▶ Několik vyrobených Si koulí.
- ▶ Měření mřížkové konstanty rentgenovou difrakcí.
- ▶ Měření topografie optickou interferometrií.
- ▶ Měření izotopového složení hmotnostní spektroskopií.

## Problémy:

- ▶ povrchová oxidace
- ▶ izotopické složení koule, tj. poměr  $^{28}\text{Si}$ ,  $^{29}\text{Si}$ ,  $^{30}\text{Si}$
- ▶ jiné nečistoty, vakance
- ▶ určení objemu a hustoty (mřížková konstanta)



# Topografie Si koulí



Rozsah barevné škály 69 nm (vlevo) a 38 nm (vpravo).

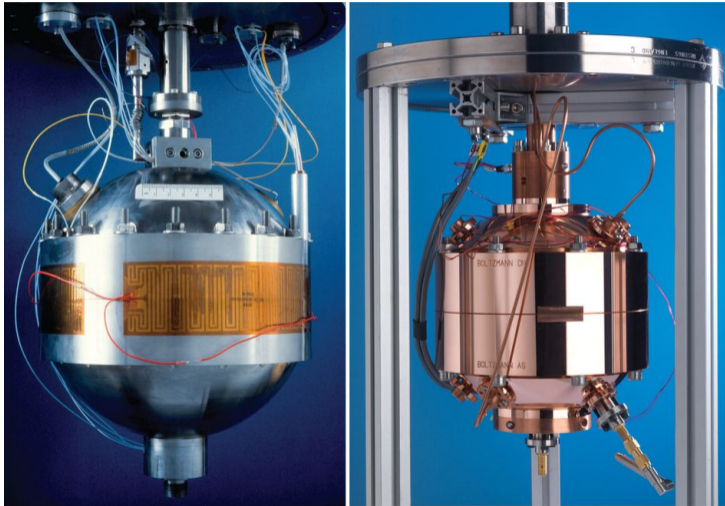
DOI:10.1088/0026-1394/52/2/360

Jak navázat termodynamickou teplotu na Boltzmannovu konstantu  $k$ ?  
(ve staré SI to znamená změření  $k$  pomocí trojného bodu vody – zachování kontinuity staré a nové SI)

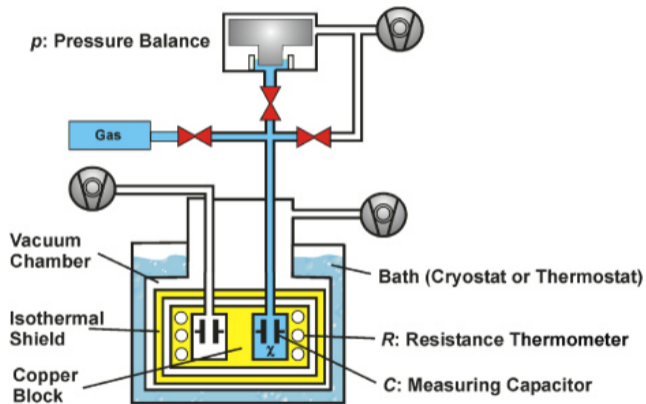
Metody měření  $k$ :

- ▶ AGT – Acoustic gas thermometry  
Měření teploty podle rychlosti zvuku
- ▶ DCGT – Dielectric Constant Gas Thermometry  
Měření teploty pomocí dielektrických vlastností plynu
- ▶ JNT – Johnson Noise Thermometry  
Josephsonův jev jako simulátor teplotního šumu odporu

# AGT – Acoustic gas thermometry

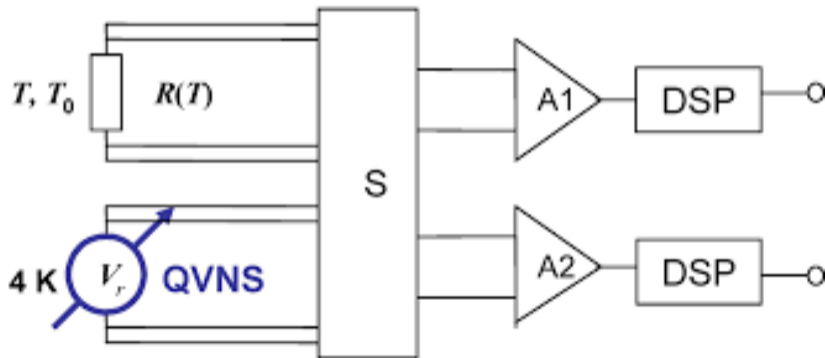


# DCGT – Dielectric Constant Gas Thermometry



# JNT – Johnson Noise Thermometry

$$U = \sqrt{4kTR\Delta f}$$





Co je to návaznost?

Návaznosti dnes

System SI

Proč a jak revize SI

Revize SI

Podmínky z 2013: splněny.

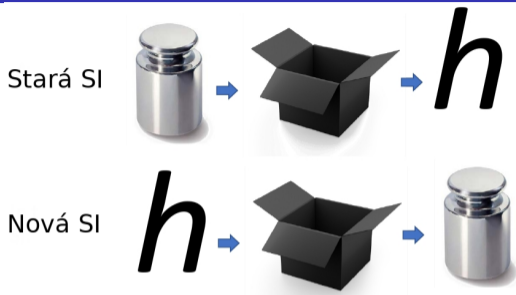
- ▶ Konzistence: Tři nezávislá měření (XRCD & WB) s konzistentními výsledky a  $u_{\text{rel}} < 5 \times 10^{-8}$ .
- ▶ Nejistoty: Nejméně jeden výsledek s  $u_{\text{rel}} < 2 \times 10^{-8}$ .
- ▶ Návaznost: Výjimečné měření s IPK v BIPM.
- ▶ Validace: Validovaná *mise en pratique* podle CIPM-MRA.

Odhlasováno 16. 11. 2018 na 26. „General Conference on Weights and Measures (CGPM)“.

Vyhlášení: den metrologie 20. 5. 2019



# Princip revize



## Stará SI

definované artefakty

**n**enulová nejistota  $h$

nulová nejistota  $\epsilon_0$

nulová nejistota IPK

nulová nejistota  $c$

## Nová SI

definované hodnoty konstant

nulová nejistota  $h$

**n**enulová nejistota  $\epsilon_0$

**n**enulová nejistota IPK

nulová nejistota  $c$

## Zkrácený vývoj definice metru

▶ 1889:

The Prototype of the metre chosen by the CIPM. This prototype, at the temperature of melting ice, shall henceforth represent the metric unit of length.

▶ 1960:

The metre is the length equal to 1 650 763,73 wavelengths in vacuum of the radiation corresponding to the transition between the levels 2p<sub>10</sub> and 5d<sub>5</sub> of the krypton 86 atom.

The definition of the metre in force since 1889, based on the international Prototype of platinum-iridium, is abrogated.

▶ 1983:

The metre is the length of the path travelled by light in vacuum during a time interval of 1/299 792 458 of a second.

The definition of the metre in force since 1960, based upon the transition between the levels 2p<sub>10</sub> and 5d<sub>5</sub> of the atom of krypton 86, is abrogated.

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

# Nové hodnoty konstant

konst.	hodnota		jednotka	$u_r$
$h$	6,626 070 15	$\times 10^{-34}$	J · s	$1,0 \times 10^{-8}$
$e$	1,602 176 634	$\times 10^{-19}$	C	$5,2 \times 10^{-9}$
$k$	1,380 649	$\times 10^{-23}$	J · K <sup>-1</sup>	$3,7 \times 10^{-7}$
$N_A$	6,022 140 76	$\times 10^{23}$	mol <sup>-1</sup>	$1,0 \times 10^{-8}$

$u_r$  – relativní standardní nejistota hodnot konstant použitých pro novou SI

# Nové hodnoty konstant

konst.	hodnota		jednotka	$u_r$
$h$	6,626 070 15	$\times 10^{-34}$	J · s	$1,0 \times 10^{-8}$
$e$	1,602 176 634	$\times 10^{-19}$	C	$5,2 \times 10^{-9}$
$k$	1,380 649	$\times 10^{-23}$	J · K <sup>-1</sup>	$3,7 \times 10^{-7}$
$N_A$	6,022 140 76	$\times 10^{23}$	mol <sup>-1</sup>	$1,0 \times 10^{-8}$

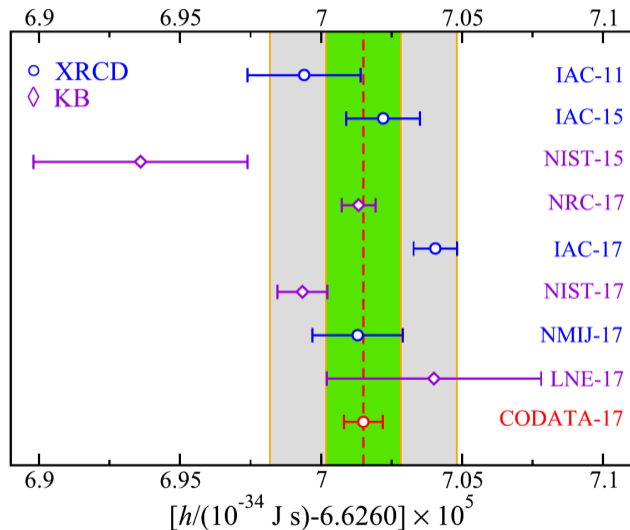
$u_r$  – relativní standardní nejistota hodnot konstant použitých pro novou SI

konst.	hodnota	jednotka
$\Delta\nu_{Cs}$	9 192 631 770	Hz
$c$	299 792 458	m · s <sup>-1</sup>
$K_{cd}$	683	lm · W <sup>-1</sup>

# Revize SI: klíčová data

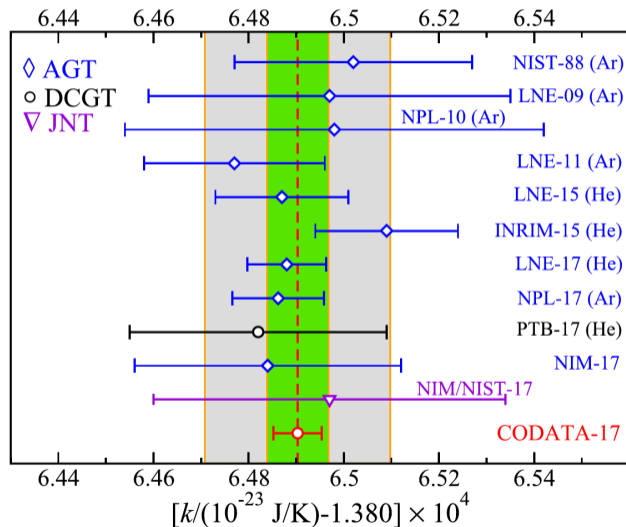
Identification <sup>a</sup>	Quantity <sup>b</sup>	Value	Rel. stand. Uncert $u_r$
NIST-15	$h$	$6.626\,069\,36(38) \times 10^{-34} \text{ J s}$	$5.7 \times 10^{-8}$
NRC-17	$h$	$6.626\,070\,133(60) \times 10^{-34} \text{ J s}$	$9.1 \times 10^{-9}$
NIST-17	$h$	$6.626\,069\,934(88) \times 10^{-34} \text{ J s}$	$1.3 \times 10^{-8}$
LNE-17	$h$	$6.626\,070\,40(38) \times 10^{-34} \text{ J s}$	$5.7 \times 10^{-8}$
IAC-11	$N_A$	$6.022\,140\,95(18) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$	$3.0 \times 10^{-8}$
IAC-15	$N_A$	$6.022\,140\,70(12) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$	$2.0 \times 10^{-8}$
IAC-17	$N_A$	$6.022\,140\,526(70) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$	$1.2 \times 10^{-8}$
NMIJ-17	$N_A$	$6.022\,140\,78(15) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$	$2.4 \times 10^{-8}$
NIST-88	$R$	$8.314\,470(15) \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$	$1.8 \times 10^{-6}$
LNE-09	$R$	$8.314\,467(23) \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$	$2.7 \times 10^{-6}$
NPL-10	$R$	$8.314\,468(26) \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$	$3.2 \times 10^{-6}$
LNE-11	$R$	$8.314\,455(12) \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$	$1.4 \times 10^{-6}$
LNE-15	$R$	$8.314\,4615(84) \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$	$1.0 \times 10^{-6}$
INRIM-15	$R$	$8.314\,4743(88) \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$	$1.1 \times 10^{-6}$
LNE-17	$R$	$8.314\,4614(50) \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$	$6.0 \times 10^{-7}$
NPL-17	$R$	$8.314\,4603(58) \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$	$7.0 \times 10^{-7}$
NIM-17	$R$	$8.314\,459(17) \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$	$2.0 \times 10^{-6}$
PTB-17	$A_g(^4\text{He})/R$	$6.221\,140(12) \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ K J}^{-1}$	$1.9 \times 10^{-6}$
NIM/NIST-17	$k/h$	$2.083\,6630(56) \times 10^{10} \text{ Hz K}^{-1}$	$2.7 \times 10^{-6}$

# Revize SI: klíčová data, měření $h$





# Revize SI: klíčová data, měření $k$



## Nové definice jednotek: kg

~~The kilogram is the unit of mass; it is equal to the mass of the international prototype of the kilogram.~~

The kilogram, symbol **kg**, is the SI unit of mass. It is defined by taking the fixed numerical value of the Planck constant  $h$  to be  $6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$  when expressed in the unit J s, which is equal to  $\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$ , where the metre and the second are defined in terms of  $c$  and  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ .

## Nové definice jednotek: A

~~The ampere is that constant current which, if maintained in two straight parallel conductors of infinite length, of negligible circular cross-section, and placed 1 metre apart in vacuum, would produce between these conductors a force equal to  $2 \times 10^{-7}$  newton per metre of length.~~

The ampere, symbol **A**, is the SI unit of electric current. It is defined by taking the fixed numerical value of the elementary charge  $e$  to be  $1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$  when expressed in the unit C, which is equal to A s, where the second is defined in terms of  $\Delta\nu_{Cs}$ .

## Nové definice jednotek: K

~~The kelvin, unit of thermodynamic temperature, is the fraction  $1/273.16$  of the thermodynamic temperature of the triple point of water.~~

The kelvin, symbol **K**, is the SI unit of thermodynamic temperature. It is defined by taking the fixed numerical value of the Boltzmann constant  $k$  to be  $1,380\,649 \times 10^{-23}$  when expressed in the unit  $\text{J K}^{-1}$ , which is equal to  $\text{kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{K}^{-1}$ , where the kilogram, metre and second are defined in terms of  $h$ ,  $c$  and  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ .

## Nové definice jednotek: mol

- ~~1. The mole is the amount of substance of a system which contains as many elementary entities as there are atoms in 0.012 kilogram of carbon 12; its symbol is “mol”.~~
- ~~2. When the mole is used, the elementary entities must be specified and may be atoms, molecules, ions, electrons, other particles, or specified groups of The molar mass of an atom such particles.~~

The mole, symbol **mol**, is the SI unit of amount of substance. One mole contains exactly  $6,022\,140\,76 \times 10^{23}$  elementary entities. This number is the fixed numerical value of the Avogadro constant,  $N_A$ , when expressed in the unit  $\text{mol}^{-1}$  and is called the Avogadro number.

The amount of substance, symbol  $n$ , of a system is a measure of the number of specified elementary entities. An elementary entity may be an atom, a molecule, an ion, an electron, any other particle or specified group of particles.

## Nové definice jednotek: s

~~The second is the duration of 9 192 631 770 periods of the radiation corresponding to the transition between the two hyperfine levels of the ground state of the caesium 133 atom.~~

The second, symbol **s**, is the SI unit of time. It is defined by taking the fixed numerical value of the caesium frequency  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ , the unperturbed ground-state hyperfine transition frequency of the caesium 133 atom, to be 9 192 631 770 when expressed in the unit Hz, which is equal to  $\text{s}^{-1}$ .

## Nové definice jednotek: m

~~The metre is the length of the path travelled by light in vacuum during a time interval of  $1/299\,792\,458$  of a second.~~

The metre, symbol **m**, is the SI unit of length. It is defined by taking the fixed numerical value of the speed of light in vacuum  $c$  to be 299 792 458 when expressed in the unit m/s, where the second is defined in terms of  $\Delta\nu_{Cs}$ .

## Nové definice jednotek: cd

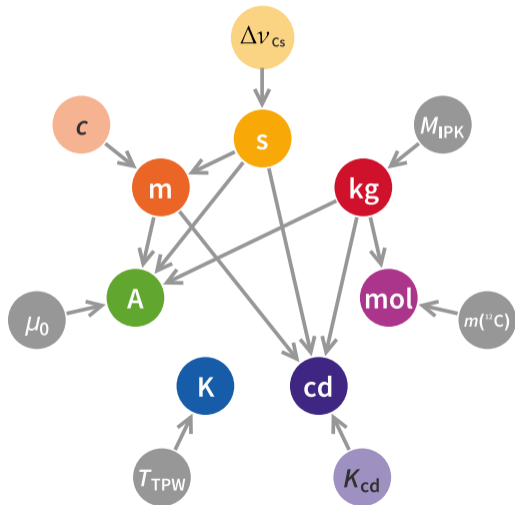
~~The candela is the luminous intensity, in a given direction, of a source that emits monochromatic radiation of frequency  $540 \times 10^{12}$  hertz and that has a radiant intensity in that direction of  $1/683$  watt per steradian.~~

The candela, symbol **cd**, is the SI unit of luminous intensity in a given direction. It is defined by taking the fixed numerical value of the luminous efficacy of monochromatic radiation of frequency  $540 \times 10^{12}$  Hz,  $K_{\text{cd}}$ , to be 683 when expressed in the unit  $\text{lm W}^{-1}$ , which is equal to  $\text{cd sr W}^{-1}$ , or  $\text{cd sr kg}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-3}$ , where the kilogram, metre and second are defined in terms of  $h$ ,  $c$  and  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ .

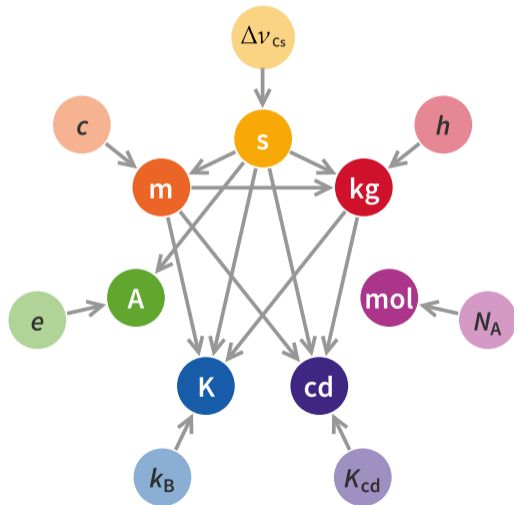


# Závislosti jednotek

stará SI



nová SI



# Vliv revize na škály jednotek

jednotka	$\left(\frac{2018}{2019} - 1\right)$ $\times 10^{-9}$	CMC ČMI $(k = 2)$ $\times 10^{-9}$
volt (V)	107	60
ohm ( $\Omega$ )	18	12
ampér (A)	89	600
coulomb (C)	89	–
watt (W)	-196	100 000
farad (F)	-18	500
henry (H)	18	15 000

CMC – obvyklé kalibrační a měřicí schopnosti, nejnižší hodnota z tabulek. Nejlepší kalibrační schopnost je obvykle menší.

Práce na kg nekončí:

- ▶ Ian A. Robinson et. all. Developing the next generation of NPL Kibble balances
- ▶ Z. Li et. all. The Status of the NIM-2 Joule Balance, NIM, Čína
- ▶ Chao et. all. The Design and Development of a Tabletop Kibble Balance at NIST
- ▶ Bettin et. all. New Silicon Crystals for a Redefined Kilogram and Mole: Isotopic Composition of the First Two Crystals, PTB
- ▶ Ahmedov: Preliminary Planck Constant Measurements in the UME Kibble Balance, Turecko

## Různé třídy etalonů kg z Si

- ▶ Projekt Si-kg k zavedení výroby a prodeje křemíkových koulí v privátní sféře.
- ▶ Studium dlouhodobých vlastností Si při použití v automat. vážících systémech.

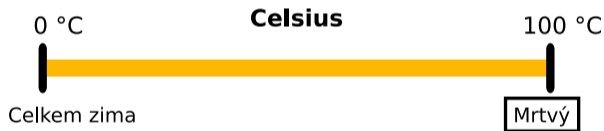
	$^{28}\text{Si}$	$^{\text{nat}}\text{Si}_{\text{qp}}$	$^{\text{nat}}\text{Si}_{\text{sc}}$
category	primary	“quasi-primary”	secondary
$u_{\text{rel}}(k=1)$ of mass	$2 \cdot 10^{-8}$	$3 \cdot 10^{-8}$	$3 \cdot 10^{-8}$
form error RONT	< 30 nm	< 20 nm	< 80 nm
average roughness Ra	< 0.3 nm	< 0.5 nm	< 1 nm
expected price	> 1 Mio. €	> 100 k €	> 10 k €
availability	limited, PTB	PTB/ industrial supplier	industrial supplier



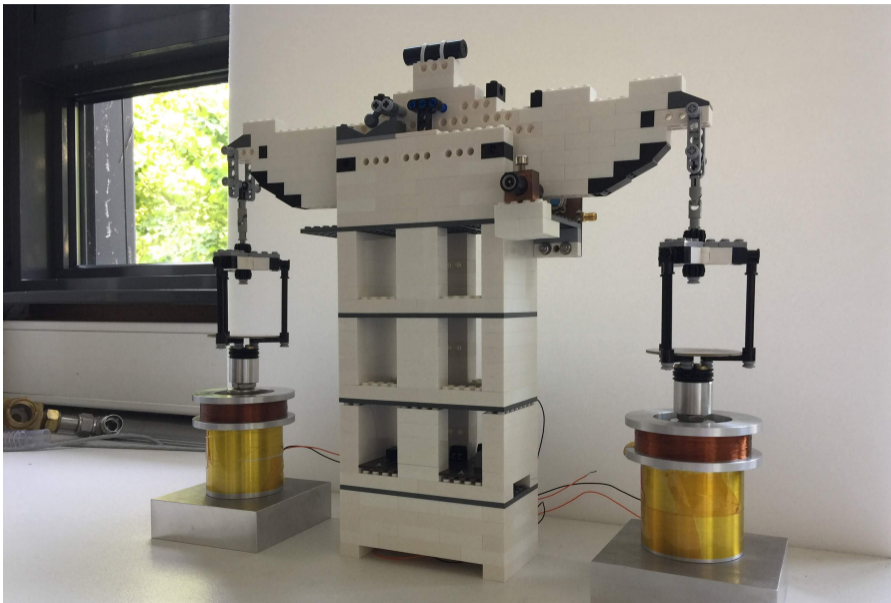
---

# Škála je důležitá!

Jak se člověk cítí:



# Kibblovy váhy z lega – plně funkční





# Vývoj definic základních jednotek

<b>metre</b>	m	length	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Original</b> (1793): <math>\frac{1}{10\,000\,000}</math> of the <b>meridian</b> through Paris between the North Pole and the Equator.<sup>FG</sup></li> <li><b>Interim</b> (1960): 1 650 763.73 <b>wavelengths</b> in a <b>vacuum</b> of the <b>radiation</b> corresponding to the transition between the <math>2p^{10}</math> and <math>5d^5</math> quantum levels of the <b>krypton-86 atom</b>.</li> <li><b>Current</b> (1983): The distance travelled by light in a vacuum in <math>\frac{1}{299\,792\,458}</math> second.</li> </ul>	L
<b>kilogram</b> <sup>[n 2]</sup>	kg	mass	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Original</b> (1793): The <b>grave</b> was defined as being the weight [mass] of one cubic decimetre of pure water at its freezing point.<sup>FG</sup></li> <li><b>Current</b> (1889): The mass of the International Prototype Kilogram (Le Grand K).<sup>[39]</sup></li> </ul>	M
<b>second</b>	s	time	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Original</b> (Medieval): <math>\frac{1}{86\,400}</math> of a day.</li> <li><b>Interim</b> (1956): <math>\frac{1}{31\,556\,925.9747}</math> of the <b>tropical year</b> for 1900 January 0 at 12 hours <b>ephemeris time</b>.</li> <li><b>Current</b> (1967): The duration of 9 192 631 770 periods of the radiation corresponding to the transition between the two <b>hyperfine</b> levels of the <b>ground state</b> of the <b>caesium-133 atom</b>.</li> </ul>	T
<b>ampere</b>	A	electric current	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Original</b> (1881): A tenth of the electromagnetic CGS unit of current. The [CGS] electromagnetic unit of current is that current, flowing in an arc 1 cm long of a circle 1 cm in radius, that creates a field of one <b>oersted</b> at the centre.<sup>[40]</sup> IEC</li> <li><b>Current</b> (1946): The constant current which, if maintained in two straight parallel conductors of infinite length, of negligible circular cross-section, and placed 1 m apart in vacuum, would produce between these conductors a <b>force</b> equal to <math>2 \times 10^{-7}</math> <b>newtons</b> per metre of length.</li> </ul>	I
<b>kelvin</b>	K	thermodynamic temperature	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Original</b> (1743): The <b>centigrade scale</b> is obtained by assigning 0 °C to the <b>freezing point</b> of water and 100 °C to the <b>boiling point</b> of water.</li> <li><b>Interim</b> (1954): The <b>triple point of water</b> (0.01 °C) defined to be exactly 273.16 K.<sup>[n 3]</sup></li> <li><b>Current</b> (1967): <math>\frac{1}{273.16}</math> of the <b>thermodynamic temperature</b> of the triple point of water</li> </ul>	Θ
<b>mole</b>	mol	amount of substance	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Original</b> (1900): The <b>molecular weight</b> of a substance in mass grams.<sup>ICAW</sup></li> <li><b>Current</b> (1967): The amount of substance of a system which contains as many elementary entities<sup>[n 4]</sup> as there are atoms in 0.012 kilogram of <b>carbon-12</b>.</li> </ul>	N
<b>candela</b>	cd	luminous intensity	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Original</b> (1946): The value of the new candle is such that the brightness of the full radiator at the temperature of solidification of <b>platinum</b> is 60 new candles per square centimetre.</li> <li><b>Current</b> (1979): The luminous intensity, in a given direction, of a source that emits monochromatic radiation</li> </ul>	J