

Metrologie

Martin Šíra

Moderní metrologie

Co to je: Věda o měření.

Moderní metrologie

Co to je: Věda o měření.

Hlavní části moderní metrologie:

- ▶ **system jednotek** (*báze měření*)

SI (The International System of Units), americké běžné jednotky (customary)

Moderní metrologie

Co to je: Věda o měření.

Hlavní části moderní metrologie:

- ▶ **system jednotek** (*báze měření*)
SI (The International System of Units), americké běžné jednotky (customary)
- ▶ **metody měření** (*jak měřit*)
fyzikální principy, Mise en pratique, guidelines

Co to je: Věda o měření.

Hlavní části moderní metrologie:

- ▶ **system jednotek** (*báze měření*)
SI (The International System of Units), americké běžné jednotky (customary)
- ▶ **metody měření** (*jak měřit*)
fyzikální principy, Mise en pratique, guidelines
- ▶ **koncept nejistot** (*kvalita měření*)
GUM – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement

Co to je: Věda o měření.

Hlavní části moderní metrologie:

- ▶ **system jednotek** (*báze měření*)
SI (The International System of Units), americké běžné jednotky (customary)
- ▶ **metody měření** (*jak měřit*)
fyzikální principy, Mise en pratique, guidelines
- ▶ **koncept nejistot** (*kvalita měření*)
GUM – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement
- ▶ **system návaznosti** (*provázanost měření*)
etalony primární, sekundární, pracovní

Co to je: Věda o měření.

Hlavní části moderní metrologie:

- ▶ **system jednotek** (*báze měření*)
SI (The International System of Units), americké běžné jednotky (customary)
- ▶ **metody měření** (*jak měřit*)
fyzikální principy, Mise en pratique, guidelines
- ▶ **koncept nejistot** (*kvalita měření*)
GUM – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement
- ▶ **system návaznosti** (*provázanost měření*)
etalony primární, sekundární, pracovní
- ▶ **porovnání, peer review, akreditace** (*kontrola měření*)
BIPM, KCDB (Key Comparison database)

Moderní metrologie

Co to je: Věda o měření.

Hlavní části moderní metrologie:

- ▶ **systém jednotek** (*báze měření*)
SI (The International System of Units), americké běžné jednotky (customary)
- ▶ **metody měření** (*jak měřit*)
fyzikální principy, Mise en pratique, guidelines
- ▶ **koncept nejistot** (*kvalita měření*)
GUM – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement
- ▶ **systém návaznosti** (*provázanost měření*)
etalony primární, sekundární, pracovní
- ▶ **porovnání, peer review, akreditace** (*kontrola měření*)
BIPM, KCDB (Key Comparison database)
- ▶ **vzájemné uznávání výsledků měření** (*rovnost měření*)
CIPM MRA (Comité international des poids et mesures, Mutual Recognition Arrangement)

Kde se setkáme s metrologií?

- ▶ Spotřebitelský sektor: prodej měřeného zboží, měření spotřeby elektřiny, plynu, vody, složení potravin, počasí.
- ▶ Výroba: měření parametrů výroby, řízení jakosti.
- ▶ Zdraví: měření dávkování léků, diagnostika.
- ▶ Právo: měření rychlosti vozidel, kriminalistika.
- ▶ Životní prostředí: kvalita vzduchu, vody, půdy.
- ▶ Věda: vše...Lord Kelvin: *“To measure is to know.”*

Požadavky na metrologii vychází z:

- ▶ ISO 9001 – systém managementu jakosti,
- ▶ ISO 17025 – norma pro kalibrační laboratoře.

Obsah

Trocha historie

Systém jednotek

Koncept nejistot

Systém návaznosti

Porovnání, peer review, akreditace

Vzájemné uznávání výsledků měření

SI prakticky

sekunda

metr

ampér

kilogram

kelvin

mol

kandela

Státní etalony

Proč a jak revize SI

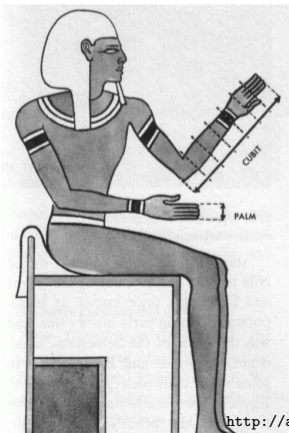
Revize SI

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!



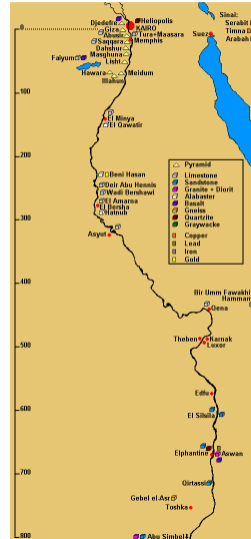
Uriah Welcome: Coudée (régle) de Mâya, ministre des Finances du roi
Toutânkhamon, 1336 – 1327 a.v. J.-C. (18^e dynastie)

Kamenolomy v historickém egyptě

Velká pyramida v Gíze



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



Císař Qin Shi Huang (dynastie Quin)
a ministr Li Si
sjednotili míry a váhy ve sjednocené číně
cca 210 l.p.n.l.

Délkové jednotky:

1 li (里)

= 300 bu (步)

= 6 chi (尺)

= 0,226 m.



Qin Shi Huang (秦始皇)



Pozlacené bronzové měřidlo, 1 chi.

Švýcarsko 1838:
průzkumem zjištěno:

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

Zvyk: veřejné míry na branách měst

Příklad z Greenwiche:



Obsah

Trocha historie

Systém jednotek

Koncept nejistot

Systém návaznosti

Porovnání, peer review, akreditace

Vzájemné uznávání výsledků měření

SI prakticky

sekunda

metr

ampér

kilogram

kelvin

mol

kandela

Státní etalony

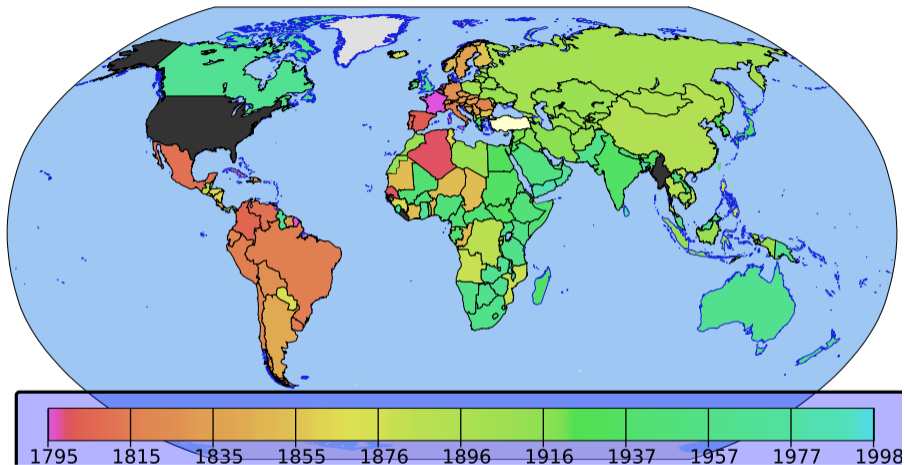
Proč a jak revize SI

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 vlnových délek světla
- ▶ 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 – kvantová SI

Země podle data přijetí SI – SI je úspěšný projekt



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

Vlastnosti systému SI

- ▶ decimální
- ▶ jednotky a díly
např. μm , mm , m , km , Mm
- ▶ (historicky) 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: m , kg , s , A , K , mol , cd
vedlejší: rad , Hz , V , N , Pa , *aj.*
- ▶ praktická
Koupit si $(1,1 \times 10^{29} m_e \text{ salámu})$ *nebo* (100 g salámu)
- ▶ definice jednotek a jejich (doporučené) fyzické realizace
např. definice sekundy

Obsah

Trocha historie

Systém jednotek

Koncept nejistot

Systém návaznosti

Porovnání, peer review, akreditace

Vzájemné uznávání výsledků měření

SI prakticky

sekunda

metr

ampér

kilogram

kelvin

mol

kandela

Státní etalony

Proč a jak revize SI

Revize SI

Co jsou nejistoty

Měřená veličina: **nelze** ji nikdy dokonale popsat.

Měříme délku tyče - ale konce tyče nejsou dokonale rovné! Vliv má i teplota, tlak, vlhkost, způsob měření, operátor, etalon, otřesy země, gravitační pole, ...

Co jsou nejistoty

Měřená veličina: **nelze** ji nikdy dokonale popsat.

Měříme délku tyče - ale konce tyče nejsou dokonale rovné! Vliv má i teplota, tlak, vlhkost, způsob měření, operátor, etalon, otřesy země, gravitační pole, ...

Vliv mnoha náhodných proměnných:

**Nejistota měření je nezaporná hodnota
charakterizující rozptyl hodnot měřené veličiny**

Výsledek měření: **(hodnota \pm nejistota)**

Co jsou nejistoty

Měřená veličina: **nelze** ji nikdy dokonale popsat.

Měříme délku tyče - ale konce tyče nejsou dokonale rovné! Vliv má i teplota, tlak, vlhkost, způsob měření, operátor, etalon, otřesy země, gravitační pole, ...

Vliv mnoha náhodných proměnných:

**Nejistota měření je nezáporná hodnota
charakterizující rozptyl hodnot měřené veličiny**

Výsledek měření: **(hodnota \pm nejistota)**

Standardní nejistota u : měřená hodnota leží v $(-u, +u)$ s 68,27% pravděpodobností.

Rozšířená nejistota U : měřená hodnota leží v $(-U, +U)$ s 95,45% pravděpodobností.

Chyba: rozdíl naměřené hodnoty a pravé hodnoty veličiny. Chybu nelze nikdy přesně zjistit.

Složky nejistoty

- ▶ definice měřené veličiny (trojný bod vody, ale jaké vody?),
- ▶ realizace měřené veličiny (šum v měřícím obvodu),
- ▶ nejistota etalonu (návaznost),
- ▶ rozlišitelnost přístroje,
- ▶ vlivy podmínek okolního prostředí (závislost na počasí),
- ▶ chyby metrologa (přepis),
- ▶ ...

Neexistuje špatné měření, jen špatně určené nejistoty.

Obsah

Trocha historie

Systém jednotek

Koncept nejistot

Systém návaznosti

Porovnání, peer review, akreditace

Vzájemné uznávání výsledků měření

SI prakticky

sekunda

metr

ampér

kilogram

kelvin

mol

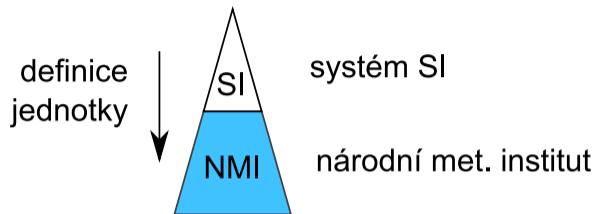
kandela

Státní etalony

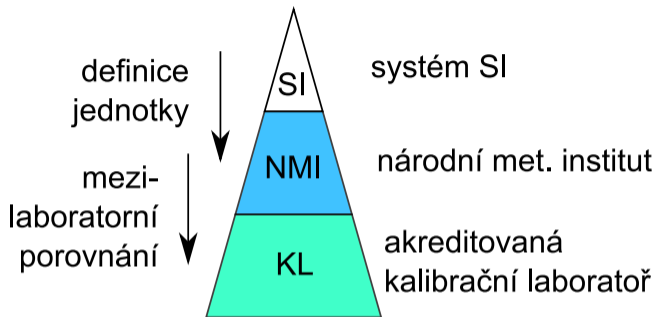
Proč a jak revize SI

Revize SI

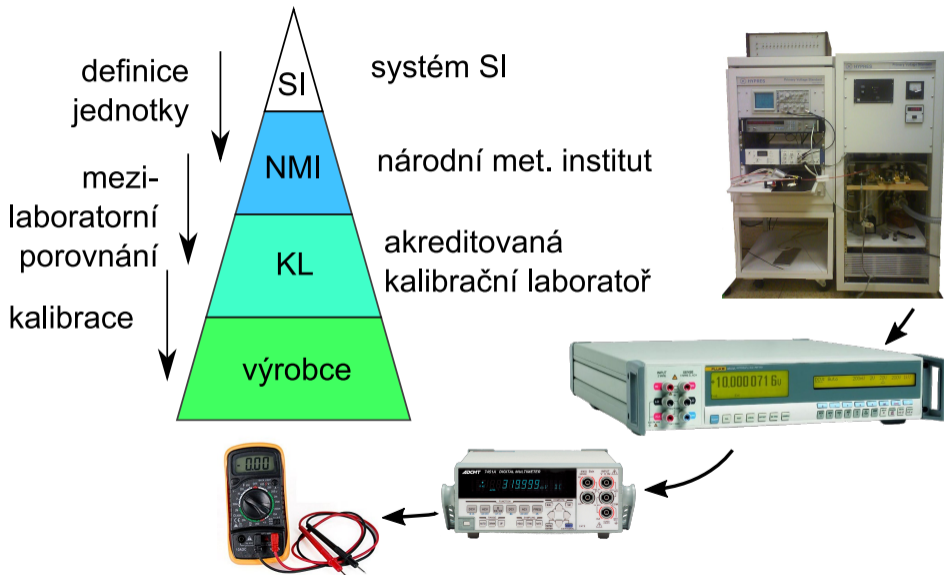
Vertikální návaznost: SI a NMI



Vertikální návaznost: kalibrační laboratoře



Vertikální návaznost: výrobci



Příklad návaznosti: kalibrační list zákaznického přístroje



Český metrologický institut

Okružní 31, 638 00 Brno

tel. +420 545 555 111

www.cmi.cz



K 2202

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 Mikroprovod 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.

Návaznost

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

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).

Sekundární, pracovní...

Transfer etalon – slouží ke krátkodobému uchování veličiny.

Obsah

Trocha historie

Systém jednotek

Koncept nejistot

Systém návaznosti

Porovnání, peer review, akreditace

Vzájemné uznávání výsledků měření

SI prakticky

sekunda

metr

ampér

kilogram

kelvin

mol

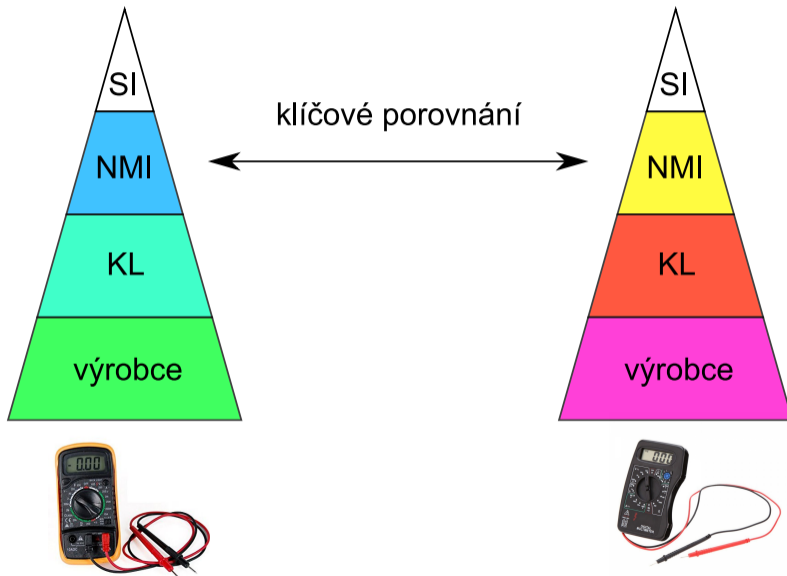
kandela

Státní etalony

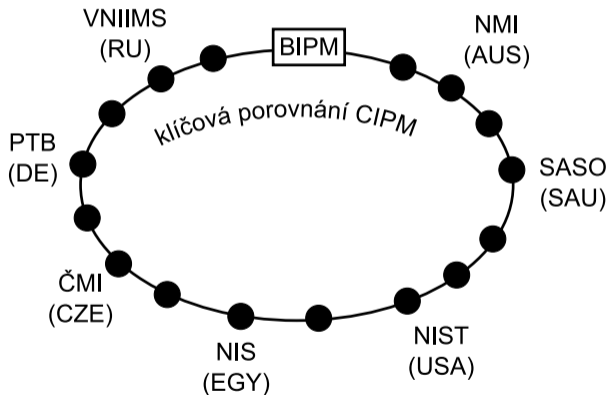
Proč a jak revize SI

Revize SI

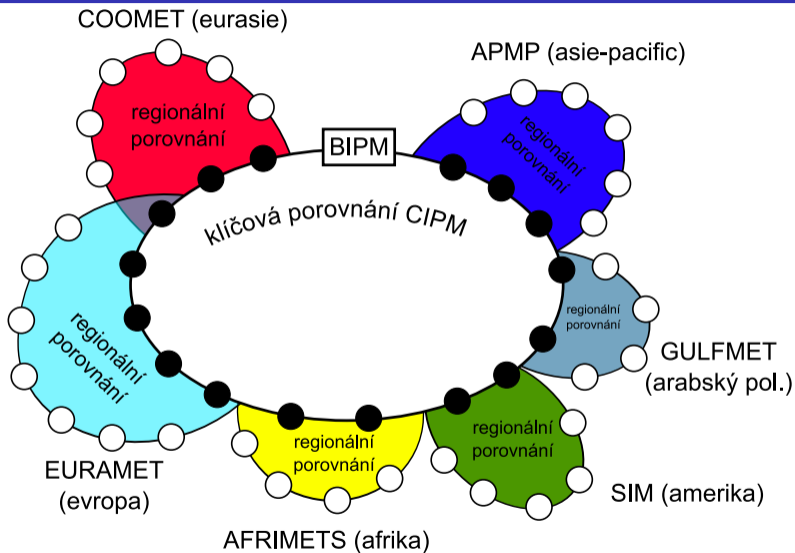
Porovnání



Klíčová porovnání

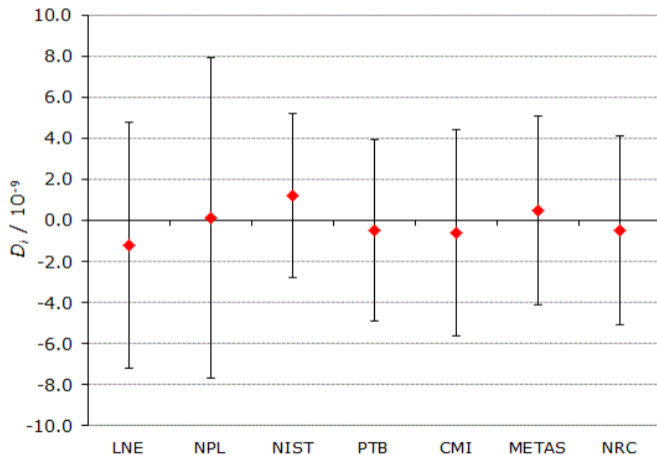


Klíčová porovnání



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>

Porovnání

Vzájemné porovnání výsledků měření laboratoře s výsledky měření referenční laboratoře.

Peer review

Posouzení správnosti měřících metod a postupů druhou stranou.

Akreditace

Potvrzení o prokázání správnosti měření (pomocí výsledků porovnání, posouzení atd.).
Obvykle záležitost na národní úrovni.

Obsah

Trocha historie

Systém jednotek

Koncept nejistot

Systém návaznosti

Porovnání, peer review, akreditace

Vzájemné uznávání výsledků měření

SI prakticky

sekunda

metr

ampér

kilogram

kelvin

mol

kandela

Státní etalony

Proč a jak revize SI

Revize SI

The Mutual Recognition Arrangements (CIPM-MRA)

Prokázání vzájemné ekvivalence a vzájemné uznávání výsledků měření mezi NMI.

Nutné pro mezinárodní obchod.

Podmíněno používáním SI a účastí na peer-review.

Schopnosti NMI jsou v databázi KCDB (Key Comparison DataBase).



Obsah

Trocha historie

Systém jednotek

Koncept nejistot

Systém návaznosti

Porovnání, peer review, akreditace

Vzájemné uznávání výsledků měření

SI prakticky

sekunda

metr

ampér

kilogram

kelvin

mol

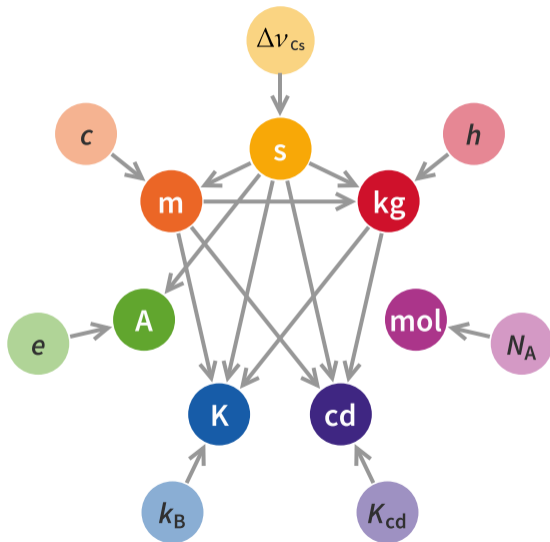
kandela

Státní etalony

Proč a jak revize SI

Revize SI

Závislosti jednotek



Obsah

Trocha historie

Systém jednotek

Koncept nejistot

Systém návaznosti

Porovnání, peer review, akreditace

Vzájemné uznávání výsledků měření

SI prakticky

sekunda

metr

ampér

kilogram

kelvin

mol

kandela

Státní etalony

Proč a jak revize SI

Revize SI

Definice jednotky sekunda

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 s^{-1} .

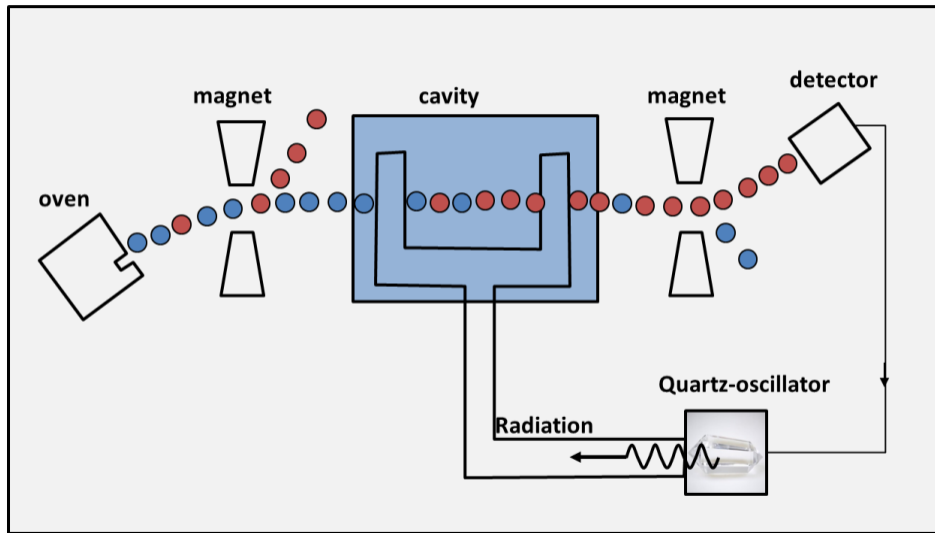
Etalony

- ▶ Cesiové hodiny – typická relativní nejistota 10^{16} (pro $\tau = 1$ den).
- ▶ Rubidiové hodiny – levnější a menší varianta, méně přesnější.
- ▶ VCXO – krystalové oscilátory.

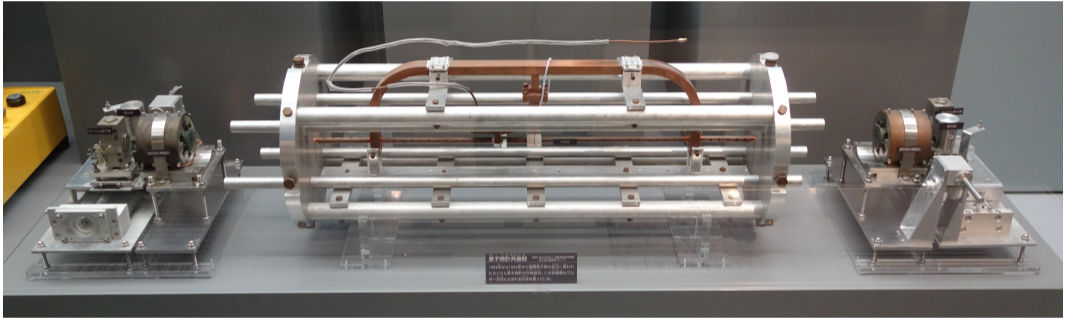
Časové škály

- ▶ TAI – průměr z 450 nejpřesnějších atomových hodin.
- ▶ UTC – občanský čas.
UTC = TAI + 37 přestupných sekund (k datu 2023-11-17).
- ▶ GPS – průměr atomových hodin systému GPS.
GPS = TAI + 19s.
- ▶ Loran-C, BeiDou, Unix time, ...

Schéma césiových hodin



Cesiové hodiny



Cesiové hodiny CRL-Cs1, 1975-1993, National Museum of Nature and Science, Tokyo

Obsah

Trocha historie

Systém jednotek

Koncept nejistot

Systém návaznosti

Porovnání, peer review, akreditace

Vzájemné uznávání výsledků měření

SI prakticky

sekunda

metr

ampér

kilogram

kelvin

mol

kandela

Státní etalony

Proč a jak revize SI

Revize SI

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 $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.

Návaznost v SI:

$$l = c \cdot \Delta t$$

Hlavní metody:

▶ **Doba šíření světelného pulzu**

pro nejistoty 1 mm na 1 m je potřeba 1 ps,
proto jen pro velké vzdálenosti $>$ km, Země – Měsíc.

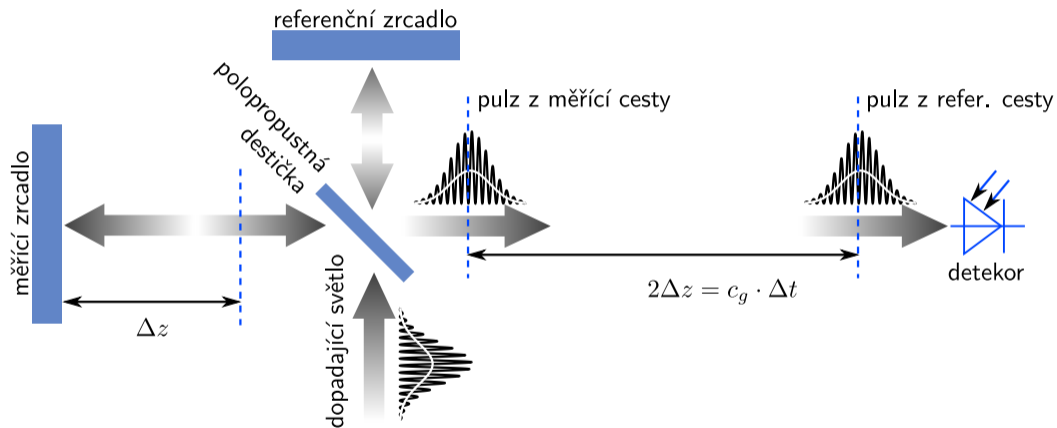
▶ **Optická interferometrie**

relativní měření, lasery He-Ne, Nd:YAG, rel. nejistoty až 10^{-11} .

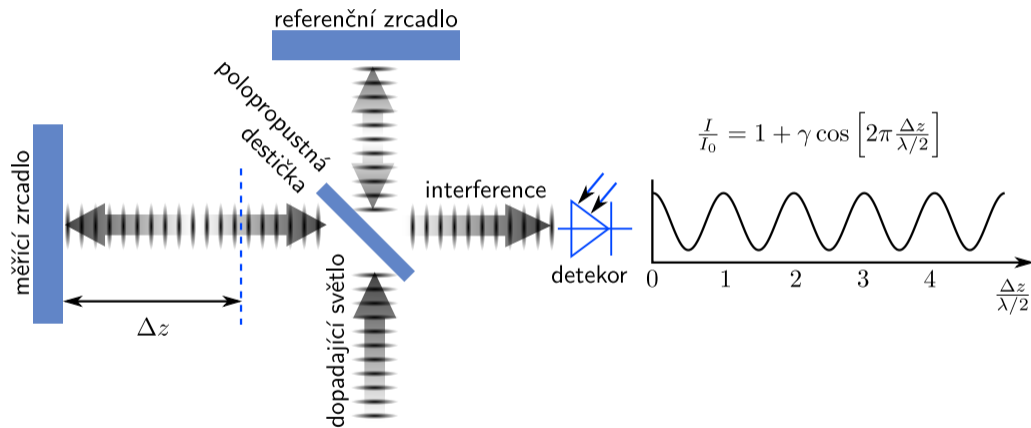
▶ **Frekvenční hřebeny**

absolutní měření, rel. nejistoty až 10^{-13} ,
malé vzdálenosti.

Praktická realizace metru - doba šíření pulzu

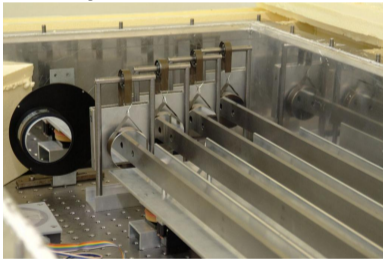


Praktická realizace metru - interferometrie

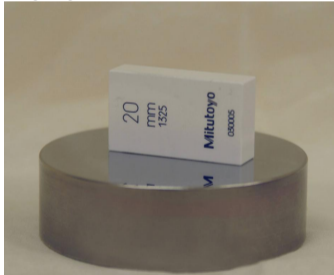


Etalony délky

Interferometr s dlouhými
koncovými měrkami:



Krátká keramická koncová
měrka:



Měřící bod státního etalonu
délky 25 m až 1450 m



Obsah

Trocha historie

Systém jednotek

Koncept nejistot

Systém návaznosti

Porovnání, peer review, akreditace

Vzájemné uznávání výsledků měření

SI prakticky

sekunda

metr

ampér

kilogram

kelvin

mol

kandela

Státní etalony

Proč a jak revize SI

Revize SI

Definice jednotky ampér

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 $\Delta\nu_{Cs}$.

Návaznost v SI:

$$I = Q/t$$

Praktická návaznost:

$$I = U/R$$

$$I = \frac{n \cdot f \cdot h}{2 \cdot e} \cdot \frac{i \cdot e^2}{h} = \frac{n \cdot i \cdot f \cdot e}{2}$$

▶ **Kvantový etalon napětí**

inverzní Josephsonův střídavý jev, do 10 V, rel. nej. 10^{-10} .

▶ **Kvantový etalon odporu**

kvantový Hallův jev, 12,9 k Ω , rel. nej. 10^{-10} .

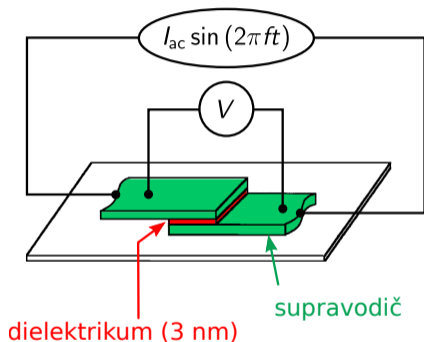
▶ Etalon proudu

počítání elektronů, ve vývoji, jen pro proudy \approx pA.

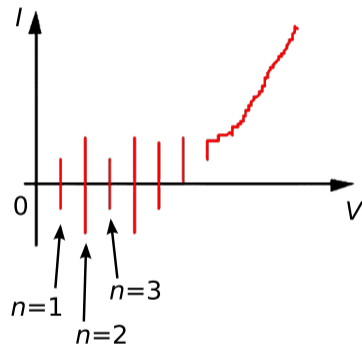
▶ **Vypočitatelný etalon kapacity**

Thompson-Lampardův etalon, obvykle 1 pF, rel. nej. 10^{-8} .

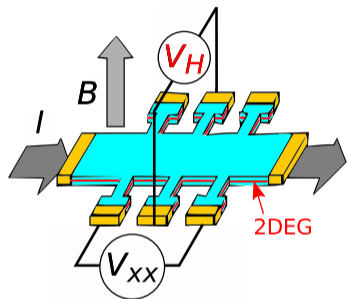
Etalon napětí – Josephsonův jev



$$V = \frac{n \cdot f \cdot h}{2 \cdot e} \quad \text{pro } f = 75 \text{ GHz} \rightarrow V = 75 \mu\text{V}$$

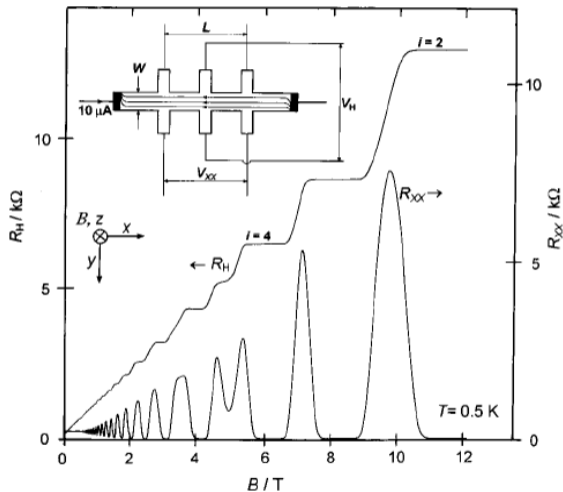


Etalon odporu – kvantový Hallův jev



$$R_H = \frac{1}{i} \cdot \frac{h}{e^2}$$

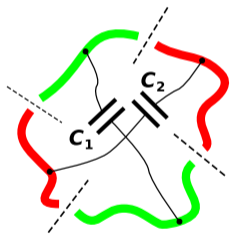
$$i \equiv 2 \rightarrow R_H = 12,906\,403\,5 \text{ k}\Omega$$



Etalon capacity – Thompson-Lampardův jev

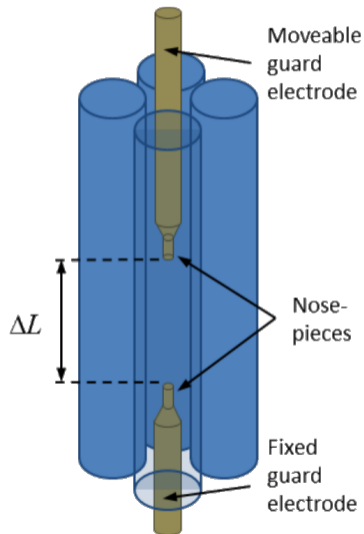
$$\exp(-\pi \cdot C_1/\varepsilon_0) + \exp(-\pi \cdot C_2/\varepsilon_0) = 1$$

(Platí jen pro nekonečně dlouhé elektrody!)



$$C = \varepsilon_0 \cdot L \frac{\ln 2}{\pi}$$

$$\Delta C \propto 1,9 \times 10^{-12} \cdot \Delta L$$

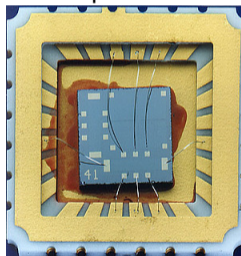


Etalony elektrických veličin

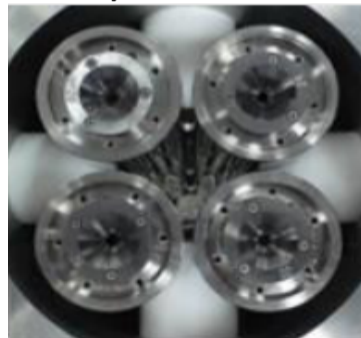
PJVS čip:



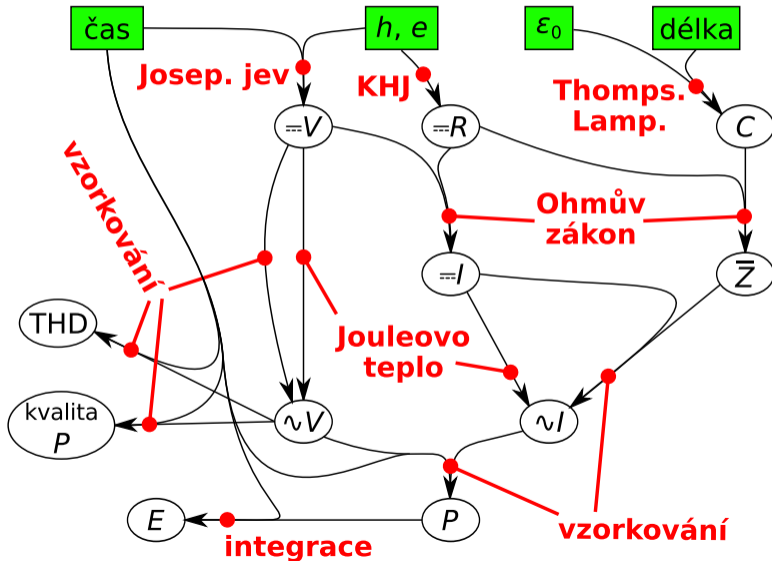
KHJ čip:



Elektrody T-L:



Praktická návaznost ss. a nf. veličin



Obsah

Trocha historie

Systém jednotek

Koncept nejistot

Systém návaznosti

Porovnání, peer review, akreditace

Vzájemné uznávání výsledků měření

SI prakticky

sekunda

metr

ampér

kilogram

kelvin

mol

kandela

Státní etalony

Proč a jak revize SI

Revize SI

Definice jednotky 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 $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.

- ▶ **Kibblovy váhy.**

Elektrické váhy.

Kv. etalony napětí a odporu, etalon tíhového zrychlení \rightarrow kg.

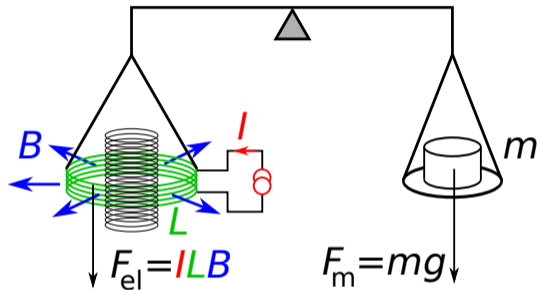
- ▶ **projekt Avogadro.**

Počítání atomů v křemíkové kouli.

Mřížková konstanta, izotopické složení, atomová hmotnost \rightarrow kg.

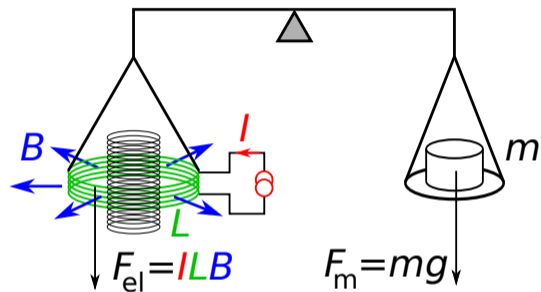
Kibblovy váhy

vážení: statické měření

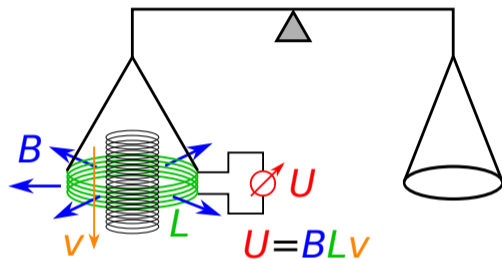


Kibblovy váhy

vážení: statické měření

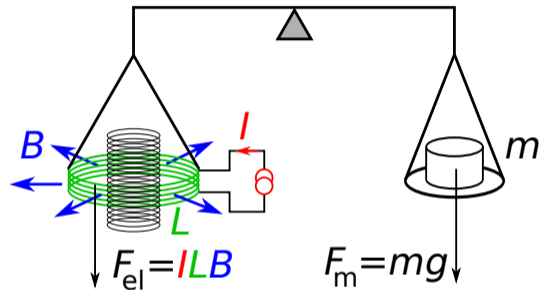


měření vlastností cívky: dynamické měření

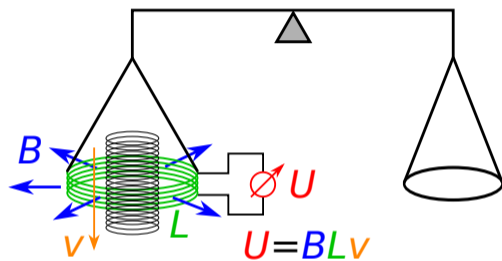


Kibblovy váhy

vážení: statické měření



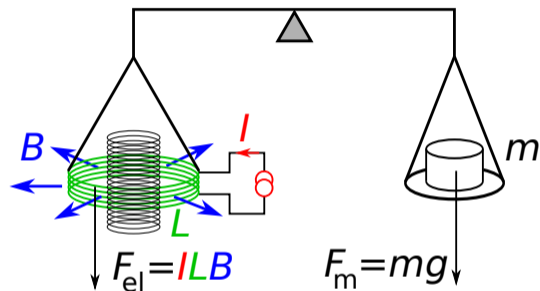
měření vlastností cívky: dynamické měření



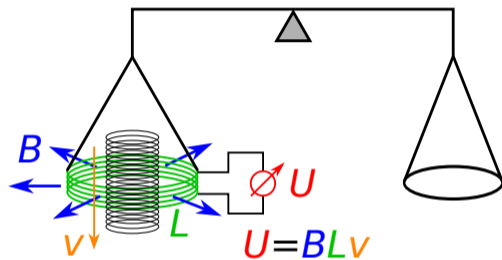
$$mgv = UI = U^2/R$$

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: $R = f(h, e^2)$

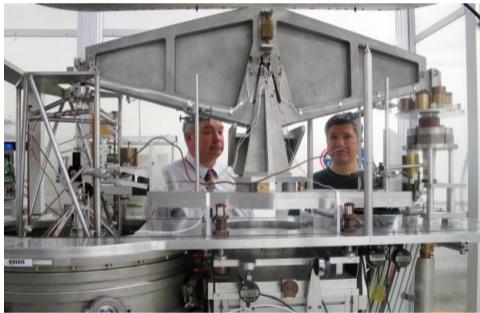
tíhové zrychlení: $g = f(\Delta\nu_{Cs}, c)$

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

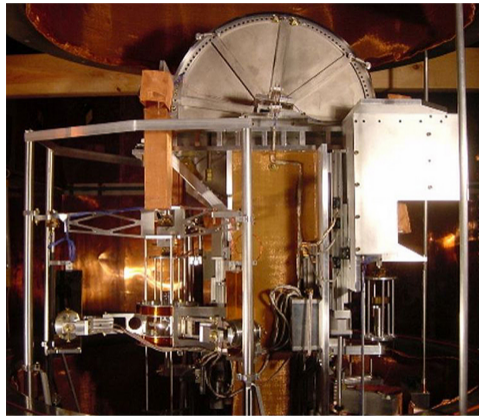
\Rightarrow

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

Kibblovy váhy



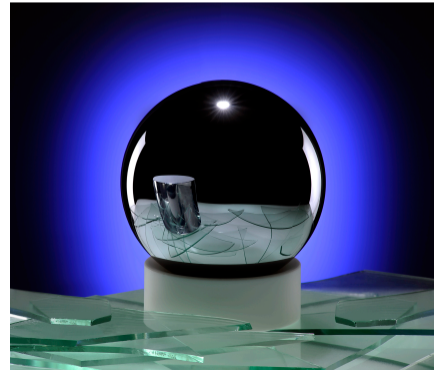
projekt NPL (VB)



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

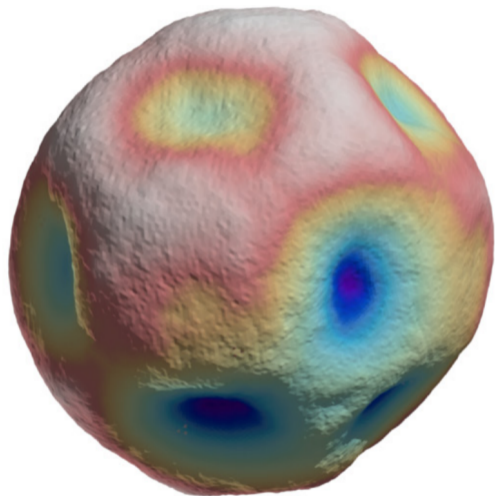
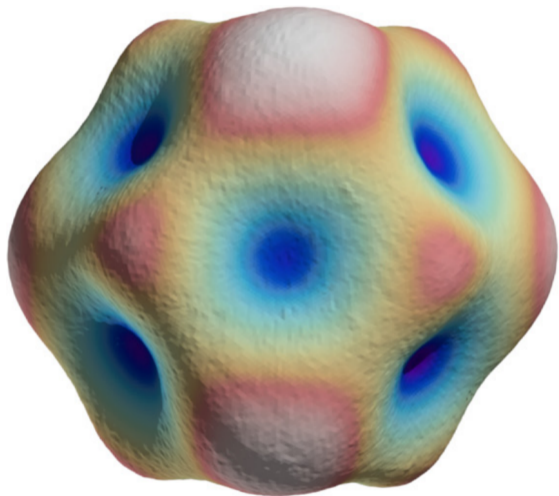
- ▶ Mezinárodní projekt.
- ▶ Několik vyrobených Si koulí.
- ▶ Měření mřížkové konstanty rentgenovou difrakcí.
- ▶ Měření topografie optickou interferometrií.
- ▶ Měření izotopového složení hmotnostní spektroskopií.

Problémy:

- ▶ povrchová oxidace
- ▶ izotopické složení koule, tj. poměr ^{28}Si , ^{29}Si , ^{30}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

Obsah

Trocha historie

Systém jednotek

Koncept nejistot

Systém návaznosti

Porovnání, peer review, akreditace

Vzájemné uznávání výsledků měření

SI prakticky

sekunda

metr

ampér

kilogram

kelvin

mol

kandela

Státní etalony

Proč a jak revize SI

Revize SI

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 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 $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.

Absolutní metody:

- ▶ **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
- ▶ Polarizing Gas Thermometry
- ▶ Refractive-index Gas Thermometry

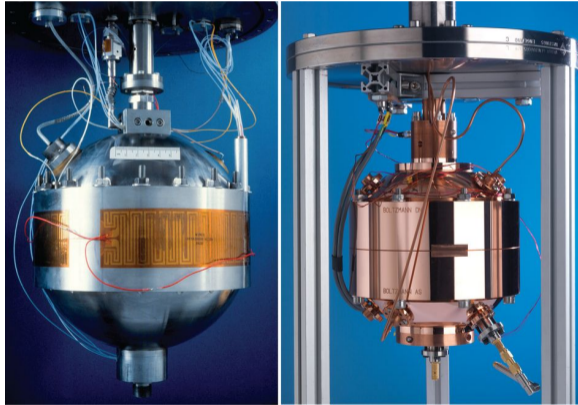
Teplotní škály:

- ▶ **ITS-90:** $\geq 0,65$ K
- ▶ **PLTS-2000:** $0,9 \times 10^{-3}$ K až 1 K

AGT – Acoustic gas thermometry

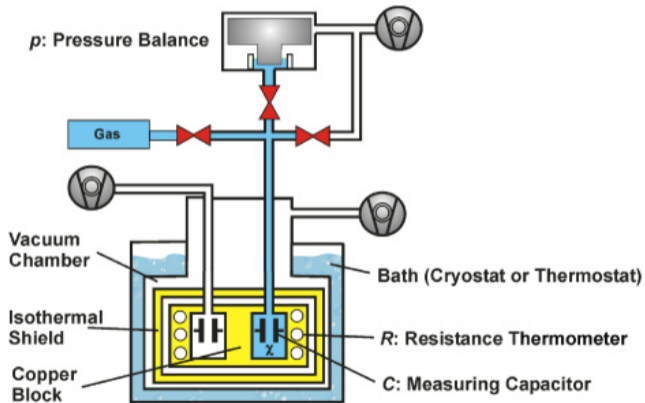
$$\text{Rychlost zvuku: } u^2 = \frac{\gamma k T}{m}$$

γ – Poissonova konstanta, m – molekulární hmotnost.



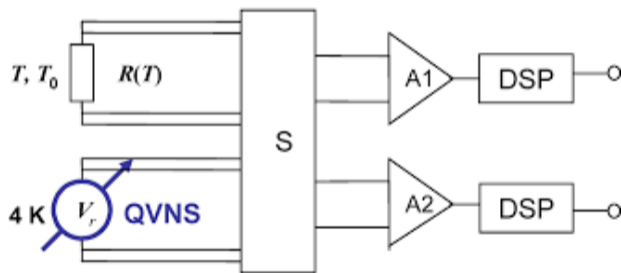
DCGT – Dielectric Constant Gas Thermometry

Kapacita deskového kondenzátoru, vakuový \leftrightarrow naplněný plynem.



JNT – Johnson Noise Thermometry

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



Teplotní škála ITS-90

Bod	K	°C
trojný bod vodíku	13,8033	-259,3465
trojný bod neonu	24,5561	-248,5937
trojný bod kyslíku	54,3584	-218,7914
trojný bod argonu	83,8058	-189,3440
trojný bod rtuti	234,3156	-38,8342
trojný bod vody	273,16	0,01
teplota tání gallia	302,9146	29,7648
teplota tuhnutí india	429,7485	156,5987
teplota tuhnutí cínu	505,078	231,928
teplota tuhnutí zinku	692,677	419,527
teplota tuhnutí hliníku	933,473	660,323
teplota tuhnutí stříbra	1234,93	961,78
teplota tuhnutí zlata	1337,33	1064,18
teplota tuhnutí mědi	1357,77	1084,62

Škála obsahuje i hodnoty tenze par pro ^3He a ^4He pro velmi nízké teploty.

Teplotní škála ITS-90

Termostaty státního etalonu teploty pro kontaktní měření



Obsah

Trocha historie

Systém jednotek

Koncept nejistot

Systém návaznosti

Porovnání, peer review, akreditace

Vzájemné uznávání výsledků měření

SI prakticky

sekunda

metr

ampér

kilogram

kelvin

mol

kandela

Státní etalony

Proč a jak revize SI

Revize SI

Definice jednotky mol

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 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.

Obsah

Trocha historie

Systém jednotek

Koncept nejistot

Systém návaznosti

Porovnání, peer review, akreditace

Vzájemné uznávání výsledků měření

SI prakticky

sekunda

metr

ampér

kilogram

kelvin

mol

kandela

Státní etalony

Proč a jak revize SI

Revize SI

definice jednotky kandela

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 540×10^{12} Hz, K_{cd} , to be 683 when expressed in the unit lm W^{-1} , which is equal to 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 $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.

Svítivost – fotometrická veličina, tedy závislá na citlivosti lidského oka na vlnové délce.

540×10^{12} Hz – zelená barva, oko nejvíce citlivé.

$$1 \text{ cd} = 1/683 \text{ W} \cdot \text{sr}$$

Obsah

Trocha historie

Systém jednotek

Koncept nejistot

Systém návaznosti

Porovnání, peer review, akreditace

Vzájemné uznávání výsledků měření

SI prakticky

sekunda

metr

ampér

kilogram

kelvin

mol

kandela

Státní etalony

Proč a jak revize SI

Revize SI

- ▶ **Čas:** Státní etalon frekvence a času.
- ▶ **Délka:** St. et. délky; délky 25 m až 1450 m; rovinného úhlu; délky a tvaru v oboru nanometrologie; geometrických rozměrů 3D objektů.
- ▶ **Elektromagnetické veličiny:** etalon stejnosměrného elektrického napětí; stejnosměrného elektrického odporu na bázi KHJ; elektrické kapacity; poměru střídavých elektrických napětí průmyslové frekvence 50 Hz; poměru střídavých elektrických proudů průmyslové frekvence 50 Hz; magnetického toku; magnetické indukce; vysokofrekvenčního výkonu; vysokofrekvenčního činitele odrazu a přenosu; intenzity vysokofrekvenčního elektromagnetického pole; nf. elektrického výkonu a práce.
- ▶ **Hmotnost:** hmotnosti; velké hmotnosti 500 kg.
- ▶ **Teplota:** teploty v rozsahu pro kontaktní měření; vlhkosti vzduchu za atmosférického tlaku; vlhkosti plynů; teploty pro bezkontaktní měření.
- ▶ **Radiometrie a fotometrie:** celkového zářivého toku viditelného záření; etalon celkového zářivého toku ultrafialového záření; etalon celkového zářivého toku infračerveného záření.
- ▶ **Síla:** síly ESZ 3 kN; 20 kN; 200 kN; 1 MN; 10 N; 500 N.
- ▶ **Moment síly:** momentu síly EZMS $1 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$; $100 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$; $10 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$; $10 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$.

- ▶ **Zrychlení:** St. etalon tíhového zrychlení
- ▶ **Tlak:** přetlaku; podtlaku a absolutního tlaku v plynném médiu; malého přetlaku, podtlaku a diferenčního tlaku v plynném médiu; přetlaku v kapalném médiu; etalon vakua; etalon tlakových diferencí; etalon vysokého vakua.
- ▶ **Ionizující záření:** jednotky aktivity radionuklidů; absorbované dávky ve vodě fotonového záření; expozice; expozičního příkonu; kermy ve vzduchu a příkonu kermy ve vzduchu fotonového záření; emise neutronů z radionuklidových zdrojů; příkonu fluence a příkonu spektrální fluence neutronů; příkonu fluence tepelných neutronů.
- ▶ **Průtok plynů a kapalin:** průtoku plynu v rozsahu $0,15 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ až $17 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$; průtoku plynu Bell Prover v rozsahu od $0,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ do $280 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$; skupinový etalon průtoku a proteklého množství technických kapalin; malého hmotnostního průtoku plynu; velmi malých průtoků kapalin.
- ▶ **Tvrдость a drsnost:** etalon stupnic tvrdosti Rockwell – A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T; stupnic tvrdosti Vickers HV 1 až HV 100; stupnic tvrdosti Brinell; drsnosti povrchu.
- ▶ **Objemová hmotnost:** St. etalon objemové hmotnosti obilí
- ▶ **Chemie:** etalon elektrolytické konduktivity v rozsahu $(0,005-10) \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$; látkového množství; veličiny pH.

Obsah

Trocha historie

Systém jednotek

Koncept nejistot

Systém návaznosti

Porovnání, peer review, akreditace

Vzájemné uznávání výsledků měření

SI prakticky

sekunda

metr

ampér

kilogram

kelvin

mol

kandela

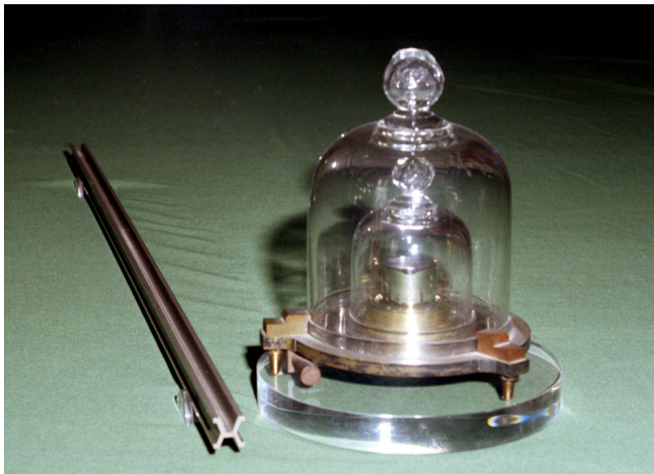
Státní etalony

Proč a jak revize SI

Revize SI

Mezinárodní prototyp metru a kilogramu

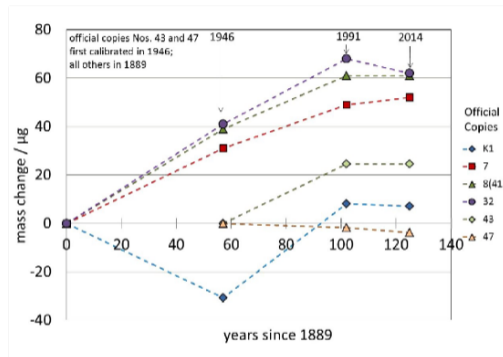
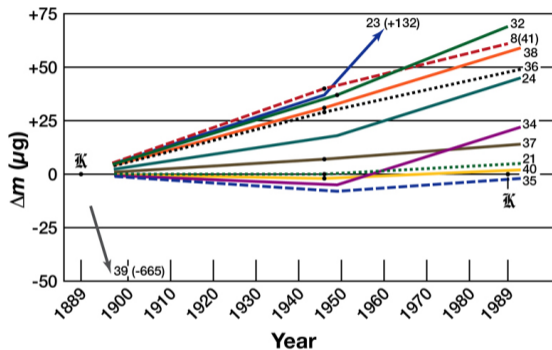
Jediný pravý
metr do
roku 1960



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

Stabilita IPK



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

Proč revize SI?

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

Proč revize SI?

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

Obsah

Trocha historie

Systém jednotek

Koncept nejistot

Systém návaznosti

Porovnání, peer review, akreditace

Vzájemné uznávání výsledků měření

SI prakticky

sekunda

metr

ampér

kilogram

kelvin

mol

kandela

Státní etalony

Proč a jak revize SI

Revize SI

Podmínky z 2013: splněny.

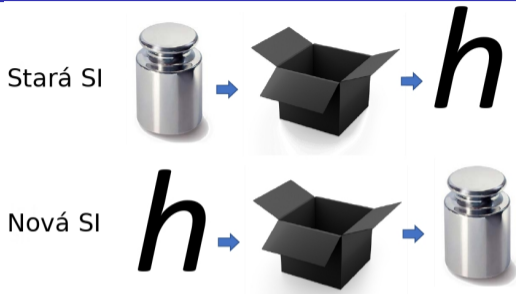
- ▶ Konzistence: Tři nezávislá měření (XRCD & WB) s konzistentními výsledky a $u_{\text{rel}} < 5 \times 10^{-8}$.
- ▶ Nejistoty: Nejméně jeden výsledek s $u_{\text{rel}} < 2 \times 10^{-8}$.
- ▶ Návaznost: Výjimečné měření s IPK v BIPM.
- ▶ Validace: Validovaná *mise en pratique* podle CIPM-MRA.

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

nenulová nejistota h

nulová nejistota ϵ_0

nulová nejistota IPK

nulová nejistota c

Nová SI

definované hodnoty konstant

nulová nejistota h

nenulová nejistota ϵ_0

nenulová 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 2p₁₀ and 5d₅ of the krypton 86 atom.
- ▶ 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.
- ▶ 2019:
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 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 ⁻¹	$3,7 \times 10^{-7}$
N_A	6,022 140 76 $\times 10^{23}$	mol ⁻¹	$1,0 \times 10^{-8}$

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 ⁻¹	$3,7 \times 10^{-7}$
N_A	6,022 140 76	$\times 10^{23}$	mol ⁻¹	$1,0 \times 10^{-8}$

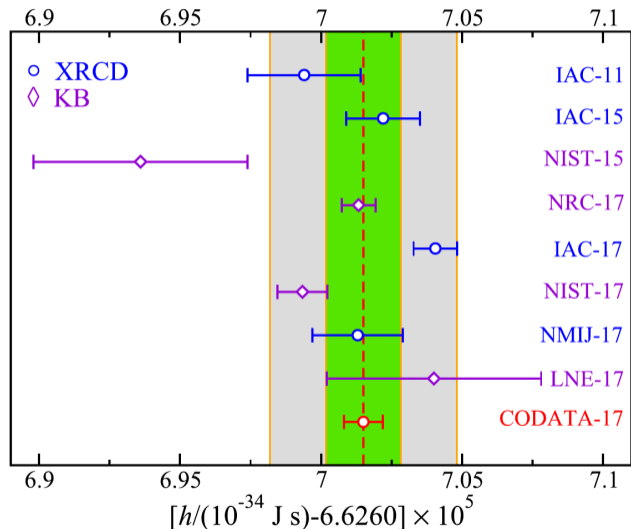
u_r – relativní standardní nejistota hodnot konstant použitých pro novou SI

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

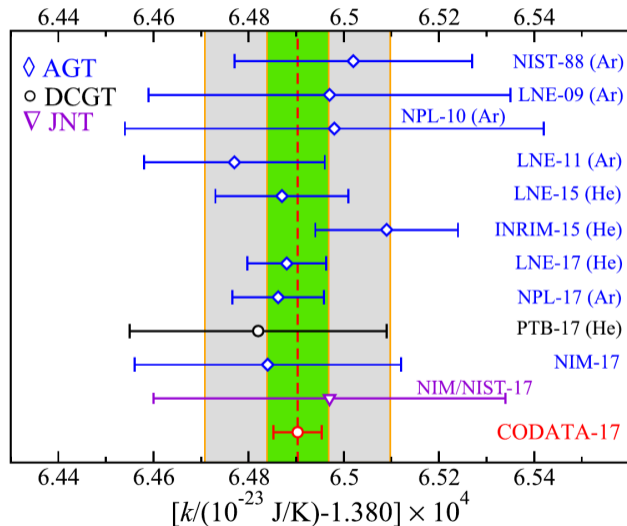
Revize SI: klíčová data

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

Revize SI: klíčová data, měření h

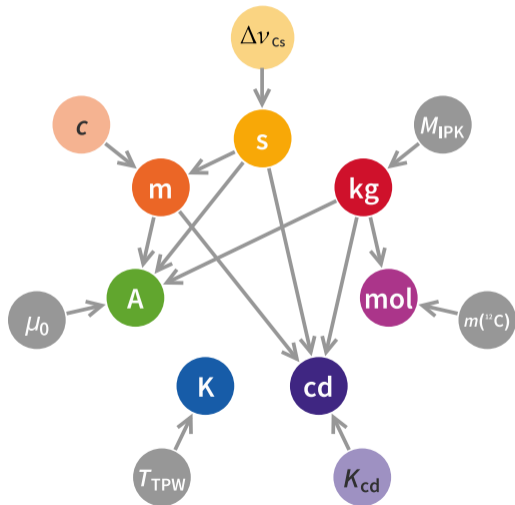


Revize SI: klíčová data, měření k

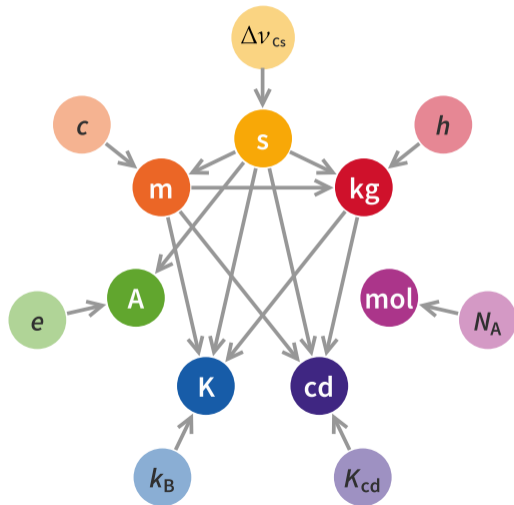


Závislosti jednotek

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 (Ω)	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 měřící 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

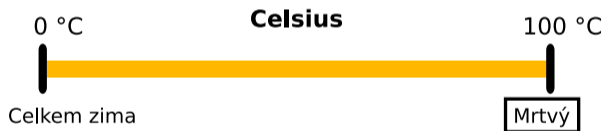
- ▶ Projekt Si-kg k zavedení výroby a prodeje křemíkových koulí v privátní sféře.
- ▶ Studium dlouhodobých vlastností Si při použití v automat. vážících systémech.

	^{28}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

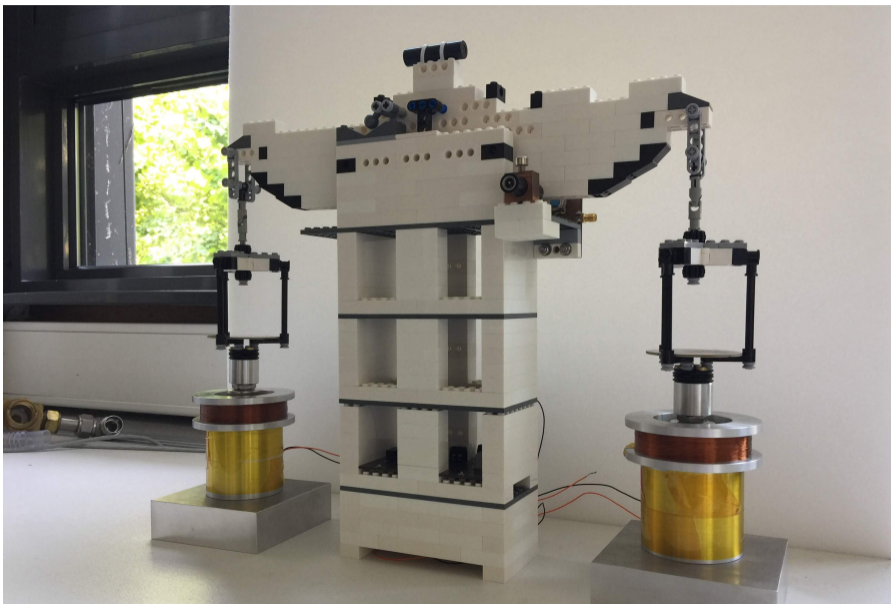


Škála je důležitá!

Jak se člověk cítí:



Kibblovy váhy z lega – plně funkční



Vývoj definic základních jednotek

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