

Jan Obdržálek
Kilogram i bez Sèvres

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 64 (2019), No. 3, 139–144

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/147883>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 2019

Institute of Mathematics of the Czech Academy of Sciences provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This document has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library*
<http://dml.cz>

Kilogram i bez Sèvres

Jan Obdržálek

Abstrakt. Článek popisuje důvody, které vedly ke změně definice standardu hmotnosti – kilogramu, jedné ze základních jednotek SI, a novou praktickou realizaci tohoto standardu.

K novým definicím

Název článku je, jak už názvy bývají, trochu přepjatý, aby byl článek přitažlivější. Ale posuďte sami: dokud byl kilogram definován tak, jak byl – tj. jako hmotnost mezinárodního prototypu¹ uloženého v Sèvres – pak logicky vzato byla *jediná* možnost dostat se k *naprosto přesnému kilogramu* jediné tam. Nyní už tato možnost není. Naprosto přesný kilogramový etalon není nikde. Můžete si ale zato etalon vytvořit kdekoli jinde, ovšem s přesností danou tím, kolik prostředků do něj hodláte investovat.

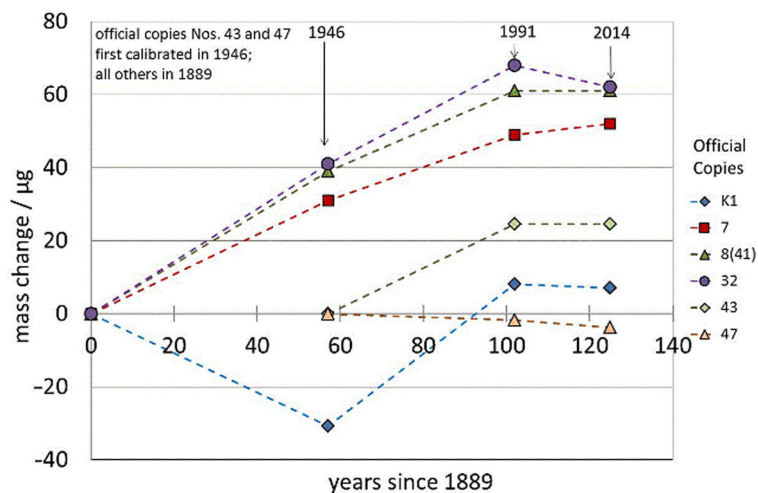
Jak je vyloženo v předcházejícím článku [4], byla provedena radikální koncepční změna v definicích základních fyzikálních jednotek SI: nyní jsou opřeny (až na sekundu) o vybrané základní a konvenční fyzikální jednotky, jejichž hodnota je stanovena přesně [8]. Změna vedla k hluboké redefinici čtyř jednotek, totiž kilogramu, ampéru, kelvínu a molu; u sekundy, metru a kandely jde spíše o novou formulaci. Redefinici kilogramu rozebírá podrobně např. [7], [6], [12].

Standard hmotnosti v čase

Původně snadno dostupné jednotky (grán = granum, tj. zrno, sáh apod.) ustoupily lokálně dohodnutým jednotkám: loket vídeňský, pražský, moravský, s „etalony“ veřejně dostupnými (kovový loket na radnici), ale tím i zranitelnými, např. ve válkách. Novověk vedl ke snaze odvodit jednotky společné a stálé. Dobrým základem se jevila pro délku a čas Země (metr jako desetimiliontá část kvadrantu zemského, den daný otáčením Země), pro hmotnost vytvořila voda přechodový můstek k mírám objemovým. Kilogram byl v rozborové zprávě zvláštní komise Francouzské akademie věd ze dne 19. 3. 1791 doporučen jako hmotnost 1 dm³ destilované vody o teplotě 0 °C, při vážení s redukcí na vakuum ([10], str. 43). Podle toho byl realizován platino-iridiový etalon uchovávaný v BIPM v Sèvres a jeho hmotnost při první Generální konferenci vah a měr (1. CGPM) posloužila za definici kilogramu. Tato definice se nyní poprvé mění. Byla de facto nejslabším článkem SI, a to jak ideově (odkaz na jistý konkrétní artefakt je nesystémový přístup), tak i prakticky: ani tento artefakt totiž není absolutně neproměnný. Porovnání s užívanějšími kopiemi vedlo k odhadu, že odchylka onoho etalonu od původní hodnoty mohla vzrůst až na cca 50 μg, tedy řádově 1 : 2 · 10⁷. Je to vidět z obrázku 1.

¹Termín „prototyp“ je historickým reliktem; nyní bychom řekli „etalon“.

Doc. RNDr. JAN OBDRŽÁLEK, CSc., Ústav teoretické fyziky, Matematicko-fyzikální fakulta UK, V Holešovičkách 747/2, 180 00 Praha 8, e-mail: obdrzalekjan@gmail.com



Obr. 1. Změny hmotnosti etalonů kilogramu (převzato se svolením BIPM z <http://www.bipm.org/en/bipm/mass/ipk/#verifications>)

Jak lépe definovat kilogram

Stejně jako se jeví přirozené definovat elektrický náboj podle jeho silových účinků (podle Coulombova zákona), tak by se jevílo přirozené definovat hmotnost přes univerzální gravitační konstantu G vyskytující se v popisu gravitační interakce dvou částic podle Newtonova gravitačního zákona. Další možnost by byla zvolit vhodnou elementární částici a kilogram definovat jako vhodný (nejlépe dekadický) násobek její (kildové) hmotnosti. První možnost ale není při požadované přesnosti technicky možná; na rozdíl od elektromagnetické interakce nelze gravitaci odstínit. Druhá alternativa zase není dost silná teoreticky: proč vybrat právě jednu z mnoha elementárních částic za základ? U elektrického náboje je to jednoduché, protože všechny částice, které lze přímo pozorovat (tedy nikoli kvarky, které pozorujeme jen ve dvojicích či trojicích), mají celistvý násobek tohoto náboje.

Planckova konstanta však tvoří most od měření času přes vyjádření energie:

$$E = hf = mc^2.$$

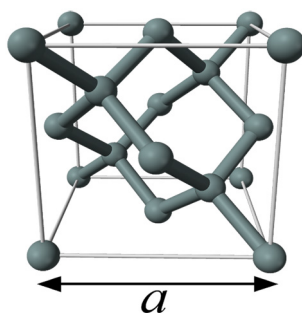
Tím se pochopitelně nemyslí zavést pomocí vztahu $f = mc^2/h$ jako jednotku hmotnosti kilogram definovaný jako hmotnost fotonu s frekvencí cca $1,4 \cdot 10^{50}$ Hz. Musíme jít oklikou.

Praktická možnost realizace standardu

V současnosti se podařil souběh tvorby standardu hmotnosti s vymezením další jednotky, konkrétně molu.

Projekt Avogadro

V tomto projektu [3] se vlastně měří Avogadrova konstanta přímo – počítáním atomů [1] v izotopicky čistém křemíku a měřením jeho molárního objemu spolu s objemem atomu (obr. 2) ve dvou kulovitých monokrystalech. Nechtějte ovšem přímo počítat atomy v takové kouli; je jich řádově $2 \cdot 10^{25}$, a Vesmír zatím trvá jen asi $4 \cdot 10^{17}$ s. Němečtí výzkumníci však – jako první – vyvinuli postup, jak rentgenovým zářením interferometricky změřit meziatomové vzdálenosti v krystalickém křemíku bez znalosti přesné vlnové délky užitého záření [2]. Z makroskopického objemu a z mikroskopické velikosti mřížky lze při známé struktuře elementární buňky křemíku (obr. 2) vypočítat počet částic v daném vzorku látky (v křemíkové kouli) a Avogadrovu konstantu, známe-li makroskopickou hmotnost vzorku a hmotnost částice, která ho tvoří (použitý křemík ^{28}Si byl vysoce izotopicky čistý, s hmotnostním zlomkem 99,999 %).

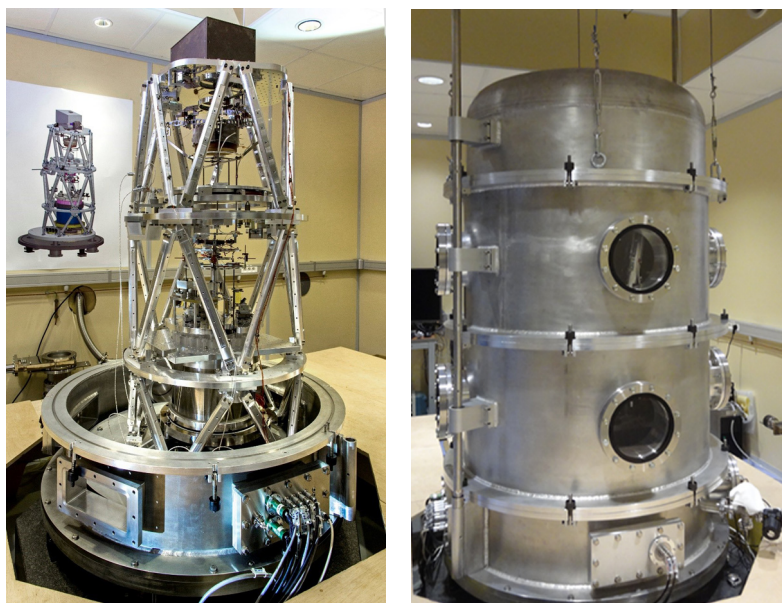


Obr. 2. Elementární mřížka křemíku (převzato se svolením BIPM z <http://www.bipm.org/en/bipm/mass/avogadro/#measurement-principle>)

Pro realizaci standardu byl nejprve v Central Design Bureau of Machine-Building OJSC, Petrohrad, Rusko (Государственный санкт-петербургский институт машиностроения (ЛМЗ-ВТУЗ)) v r. 2004 izotopicky obohacován plynný SiF_4 na odstředivkách na požadovanou čistotu. Z něj v Institute of Chemistry of High-Purity Substances Ruské akademie věd vyrobili redukci a usazováním 5kg polykrystalický ingot. Z toho v r. 2007 v Leibniz-Institut für Kristallzüchtung v SRN vyrobili monokrystal a z něj v Australian Centre for Precision Optics dvě koule AVO28-S5 a AVO28-S8. Monokrystalické křemíkové kilogramové koule vyrobili nesmírně přesně: jejich průměry v cca 30 různých směrech se liší maximálně o 30 až 50 nm. (To by na zeměkouli odpovídalo nanejvýš dvoumetrové výšce Himalájí.) Poté byly interferometricky změřeny průměry v cca 400 000 směrech (s nejistotou 1 nm) a z nich byl vypočten objem. Byla ovšem započtena i vrstva oxidu křemičitého tloušťky několika nanometrů, která se při leštění na křemíku vytvoří [13]. Avogadrova konstanta tak byla stanovena jako $N_A = 6,022\,140\,82(18) \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$.

Projekt Kibblovy váhy

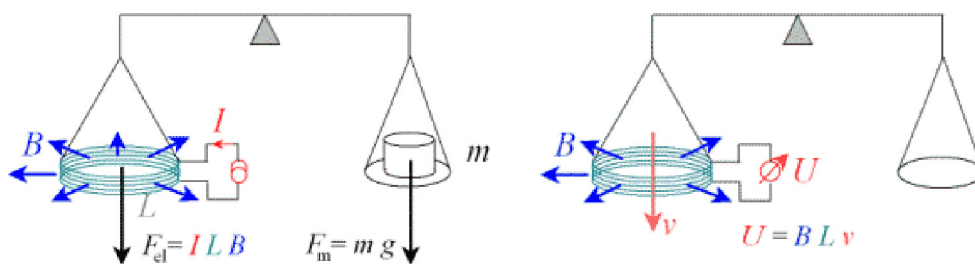
Tento projekt [11], obr. 3, dříve zvaný „výkonové váhy“ – „watt balance“ – nyní „Kibble balances“ na počest autora (Bryan Peter Kibble, 1938–2016), byl navržen roku 1975. Měření má dva „módy“; při obou se pracuje s touž cívkou s indukčností L umís-



Obr. 3. „Jednomódové“ provedení Kibblovy váhy, vlevo otevřené (převzato se svolením BIPM z <http://www.bipm.org/en/bipm/mass/watt-balance/#overview>) a vpravo ve vakuovém krytu (převzato se svolením BIPM z <http://www.bipm.org/en/bipm/mass/watt-balance/#apparatus>)

těnou v tomtéž magnetickém poli \vec{B} . V prvním módu – statickém měření („weighing“) se vyvažuje cívka s hmotností m v tíhovém poli g elektrickým proudem I cívkou zvoleným tak, aby cívka zůstávala v klidu oproti tíži. Při druhém módu, v dynamickém měření, neprochází cívkou vnější proud, ale cívka klesá rychlostí v v magnetickém poli \vec{B} , čímž se v ní indukuje elektrické napětí U . Přitom se používá Josephsonův jev pro vysoce přesné měření elektrického proudu a kvantový Hallův jev pro vysoce přesné měření elektrického napětí.

Při statickém měření v prvním módu (obr. 4a) platí v rovnováze $F_{el} = F_m$, odkud $ILB = mg$. Při pohybu v druhém módu (obr. 4b) se indukuje napětí $U = BLv$.



Obr. 4. Statický (a) a dynamický (b) mód na Kibblových váhách (převzato se svolením BIPM z <http://www.bipm.org/en/bipm/mass/watt-balance/#overview>)

Z porovnání obou měření dostaneme vztah

$$UI = mgv.$$

Součin $U \cdot I$ má rozměr výkonu, a proto vznikl název „výkonové váhy“. Je to ovšem s jistou nadsázkou, protože proud a napětí se zde principiálně měří samostatně ve dvou různých měřeních. Jejich součin je tedy jen umělou konstrukcí, nikoli reálným výkonem.

Napětí U se měří Josephsonovým jevem, kde $U = u' f_J \frac{h}{2e} = u' \frac{f_J}{K_J}$ s bezrozměrovou konstantou u' , Josephsonovou frekvencí f_J , Josephsonovou konstantou K_J , Planckovou konstantou h a elementárním nábojem e . Proud se měří kvantovým Hallovy jevem, při němž je neznámý odpor R násobkem bezrozměrové veličiny r' , a tedy $R = r' \frac{h}{e^2} = = r' R_K$, kde R_K je von Klitzingova konstanta. Z ní a z Josephsonovy konstanty určíme velmi přesně hodnotu Planckovy konstanty [9]

$$h = 4/(K_J^2 R_K)$$

a konečně hmotnost m pomocí Planckovy konstanty h a frekvencí f ve tvaru

$$m = \frac{u'_1 u'_2 f_{J,1} f_{J,2}}{r'} \frac{1}{gv} \frac{h}{4}.$$

Měření frekvence dokážeme provést nesmírně přesně. V posledním provedení byla navíc cívka navinuta bifilárně („one-mode measurement scheme“, viz obr. 3) a oba „módy“ měření mohly probíhat současně. To dále významně zvýšilo přesnost i reprodukovatelnost měření (zejména díky shodnosti pole magnetické indukce \vec{B} v obou „módech“ měření).

Ale to jméno...

Nepříjemný historicky vzniklý problém představuje název *kilogram*, který už obsahuje předponu „kilo“. Další násobky se tedy jazykově správně, ale nesystémově odvozují od slova „gram“: máme proto miligram, a nikoli (očekávaný) mikrokilogram. Při revizi [5] řady norem ISO 80000 a IEC 80000 (Quantities and units) se uvažuje i o novém názvu jednotky, konkrétně rutherford, $1 \text{ Rd} = 1 \text{ kg}$ s tím, že by kilogram zůstal jako vedlejší název (stejně jako zůstal litr pro dm^3). Lidé by si snad časem odvykli kilogramu, jako si (většinou) odvykli soustavě CGS. Námitka, že rutherford se značkou Rd byl roku 1946 použit jako jednotka radioaktivity, totiž $1 \text{ Rd} = 1 \text{ MBq}$, již neobstojí po zavedení jednotky becquerel $1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$ v r. 1975. Ovšem zvyk je železná košile a nyní nelogickému teploměru (namísto logického teplotoměru) se nám taky nechce odvyknout...

L i t e r a t u r a

- [1] ANDREAS, B., et al.: *Counting the atoms in a ^{28}Si crystal for a new kilogram definition*. Metrologia 48 (2011), S1–S13.

- [2] BONSE, U., HART, M.: *Principles and design of Laue-case X-ray interferometers*. Z. Phys. 188 (1965), 154–164.
- [3] International Avogadro Project [online].
Dostupné z: <http://www.bipm.org/en/bipm/mass/avogadro>
- [4] KLENOVSKÝ, P., PRAŽÁK, D.: *Nové definice základních jednotek soustavy SI*. PMFA 64 (2019), 129–138.
- [5] OBDRŽÁLEK, J.: *Tendence při revizi řady norem ISO/IEC 80000 Physical quantities and units*. Metrologie 25 (2016), 22–23.
- [6] OBDRŽÁLEK, J.: *Nový kilogram v SI*. Čs. čas. fyz. 69 (2019), 244–246.
- [7] OBDRŽÁLEK, J.: *Nové základní jednotky SI*. Čs. čas. fyz. 69 (2019), 254–257.
- [8] On the revision of the International System of Units (SI) [online].
Dostupné z: <http://www.bipm.org/utis/en/pdf/CGPM/Draft-Resolution-A-EN.pdf>
- [9] SCHLAMMINGER, S., et al.: *A summary of the Planck constant measurements using a watt balance with a superconducting solenoid at NIST*. Metrologia 52 (2015), L5–L8.
- [10] ŠINDELÁŘ, V., TŮMA, Z.: *Metrologie, její vývoj a současnost*. Česká metrologická společnost, Praha, 2002.
- [11] The BIPM Kibble balance (watt balance) [online].
Dostupné z: <http://www.bipm.org/en/bipm/mass/watt-balance>
- [12] The International System of Units (SI) [online].
Dostupné z: <http://www.bipm.org/en/measurement-units/#si-base-units>
- [13] ZAKEL, S., WUNDRACK, S., NIEMANN, H., RIENITZ, O., SCHIEL, D.: *Infrared spectrometric measurement of impurities in highly enriched ‘Si28’*. Metrologia 48 (2011), S14–S19.