

Pavel Klenovský; Dominik Pražák
Nové definice základních jednotek soustavy SI

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 64 (2019), No. 3, 129–138

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/147881>

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>

Nové definice základních jednotek soustavy SI

Pavel Klenovský, Dominik Pražák

Abstrakt. Článek je věnován problematice redefinice některých základních jednotek SI: jde o kilogram, ampér, kelvin a mol. V listopadu 2018 byla tato redefinice po mnoha letech výzkumu schválena na 26. zasedání Generální konference pro míry a váhy v Paříži. I vzhledem k faktu, že taková zásadní změna definic probíhá obvykle jednou za mnoho desítek let, přilákala tato záležitost značnou pozornost světových médií a považujeme za vhodné s ní seznámit i českou odbornou veřejnost. Je třeba v této souvislosti poukázat i na málo známý fakt, že řada Nobelových cen za fyziku byla udělena právě za objevy v oblasti metrologie. I když reálný dopad do praxe je zanedbatelný, cílem článku je seznámit čtenáře přístupnou formou se zákulisím a významem této redefinice z pohledu zástupců Českého metrologického institutu, kteří se za ČR celého procesu přímo účastnili.

Jednání 26. zasedání Generální konference pro míry a váhy

Redefinice základních jednotek Mezinárodní soustavy jednotek SI (Système International d'Unités) byla klíčovým bodem 26. zasedání Generální konference pro míry a váhy (Conférence générale des poids et mesures – CGPM), které se uskutečnilo v Paříži, Francie, ve dnech 13. až 16. 11. 2018. Jednání se zúčastnila česká vládní delegace stanovená usnesením vlády č. 706/2018, jejímž členem byl mj. první autor tohoto článku, viz též [12]. Generální konference je nejvyšším orgánem mezivládní dohody zvané Metrická konvence, ke které Československo přistoupilo v roce 1922, i když Rakousko-Uhersko bylo zakládajícím členem. Česká republika byla na základě oficiální žádosti přijata za plnoprávného člena v roce 1993 jako nástupnický stát České a Slovenské Federativní Republiky.

Úvodem pár informací ze zasedání CGPM: Prezident Mezinárodního výboru pro míry a váhy (Comité international des poids et mesures – CIPM) přednesl zprávu o činnosti CIPM od 25. zasedání CGPM. Za poslední 4 roky přibylo 5 nových členských států (Litva, Spojené arabské emiráty, Slovinsko, Černá Hora a Ukrajina) a 6 nových přidružených členů (Ázerbájdžán, Katar, Etiopie, Tanzanie, Kuvajt a Uzbekistán). Od posledního zasedání CGPM byla vyloučena Dominikánská republika (2015) a z přidružených zemí Jemen (2018). Metrická konvence má v současné době 60 členských států a 42 přidružených států a ekonomik, včetně všech států Evropské unie kromě Kypru. Ve zprávě prezidenta je také podrobněji popsán dosažený pokrok v jednotlivých technických oblastech činnosti Mezinárodního úřadu pro míry a váhy (Bureau international des poids et mesures – BIPM), jako je hmotnost, wattové váhy, čas, elektřina, ionizující záření a chemie. V neposlední řadě zmínil finanční a administrativní záležitosti.

RNDr. PAVEL KLENOVSKÝ, Český metrologický institut, Okružní 772/31, 638 00 Brno, e-mail: pklenovsky@cmi.cz, Mgr. DOMINIK PRAŽÁK, Ph.D., Český metrologický institut, Okružní 772/31, 638 00 Brno, e-mail: dprazak@cmi.cz

Ředitel BIPM následně představil program práce pro období 2020–2023. Hovořil o hmotnosti – wattových vahách, čase, elektřině, ionizujícím záření a chemii (včetně klimatických změn, forenzní analýzy atd.). U každé oblasti zmínil hlavní aktivity, návrh práce pro další období a zejména pak nároky na finance a pracovníky. Dále by se měla rozvíjet mezinárodní spolupráce – zastupování komunity národních metrologických institutů (NMI) a spolupráce s dalšími organizacemi jako ISO, ILAC, CIE, OIML atd. BIPM spolupracuje na přípravě různých workshopů a v neposlední řadě pokračuje v práci na databázi klíčových porovnání KCDB 2.0. V posledních letech se v rámci činnosti BIPM rozšiřuje prvek pomoci rozvíjejícím se zemím.

Dále bylo poslední zasedání věnováno hlasování o uneseních:

- Hlasování o usnesení A (o redefinici Mezinárodní soustavy jednotek SI) na slavnostním otevřeném zasedání dne 16. listopadu: všichni pro – usnesení jednomyslně přijato.
- Hlasování o usnesení B (o definici časových stupnic): dosud neexistovaly ucelené definice dvou klíčových časových stupnic TAI (mezinárodní atomový čas) a UTC (univerzální koordinovaný čas) jako plnohodnotná usnesení konference CGPM, všichni pro – usnesení přijato.
- Hlasování o usnesení C (o cílech BIPM): všichni pro – usnesení přijato.
- Hlasování o usnesení D (dotace BIPM pro léta 2020–2023): žádný hlas proti, pět se zdrželo hlasování (Rakousko, Španělsko, Itálie, Slovensko a ČR v souladu s UV č. 706/2018), všichni ostatní pro – usnesení přijato.
- Hlasování o usnesení E (o dluzích členských států na příspěvku a o procesu vyloučení): všichni pro – usnesení přijato.

Hlavní část jednání poslední den zasedání byla věnována schválení zásadní redefinice čtyř základních jednotek SI (návrh usnesení A). Týká se to zejména redefinice kilogramu na základě fyzikální konstanty. Další redefinice se týkají ampéru, kelvinu a molu. U ostatních základních jednotek byly provedeny pouze změny formulací existujících definic. V předstihu byla provedena aktualizace databáze fyzikálních konstant a jejich nejistot, viz [17]. Předložený návrh usnesení A je výsledkem mnohaleté práce expertních komisí a jednotlivých metrologů. Na dalších konferencích se očekává schválení redefinice jednotky času – sekundy – na základě optických hodin (místo současné definice na bázi přechodu mezi dvěma hladinami velmi jemné struktury základního stavu atomu cesia).

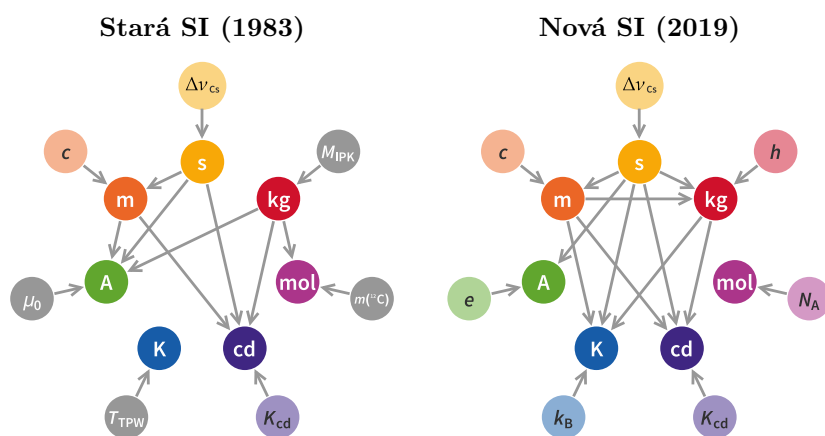
Redefinice musela být samozřejmě navržena tak, aby nedošlo k výraznější změně hodnot jednotek (reálný dopad do praxe je zanedbatelný). Zároveň ale bylo třeba dosáhnout maximálního mediálního ohlasu. A to je jistě chvályhodné, protože to může obrátit pozornost veřejnosti na metrologii jako celek v tom smyslu, aby si občané uvědomili, že metrologie a měření jsou v jejich životech prakticky všudypřítomné. Jistě k tomu přispěla i osobní účast a přednášky dvou laureátů Nobelovy ceny za fyziku, Williama D. Phillipse (1997 – NIST USA) a Klause von Klitzinga (1985 – Max Planck Institute for Solid State Research, SRN), což v poslední, otevřený den zasedání přilákalo na konferenci mj. i značný počet studentů z pařížských vysokých škol. Dr. Phillips se neobával nazvat stav, kdy u jedné jednotky (kilogramu) dodnes žijeme s prakticky 150 let starou definicí, za ostudný.

Podstata nové podoby SI

Mezinárodní soustava jednotek SI je nejdůležitější a jedinou celosvětově používanou soustavou jednotek, která je zásadní pro všechny obory lidské činnosti od obchodu přes průmysl až po vědu a výzkum. Její vytvoření je základním výsledkem mezinárodní smlouvy, známé pod názvem Metrická konvence. Jejím jádrem je sedm základních jednotek: sekunda, metr, kilogram, ampér, kelvin, mol a kandela. Jednotky měření ostatních veličin jsou ze základních odvozeny na základě fyzikálních rovnic vyjadřujících vztahy mezi veličinami. Změny v soustavě SI jsou přijímány na zasedáních CGPM. Definice základních jednotek SI prošla největší změnou ve své historii. Zájemci najdou podrobné informace v přehledových článcích: jednak je to obecný text přímo od pracovníků BIPM [19], jednak text specializovaný na metrologii pro chemii [7].

Na právě skončeném 26. zasedání CGPM ve Versailles byla odhlasována redefinice čtyř základních jednotek SI (kilogramu, ampéru, kelvinu a molu) a nové formulace zbývajících tří (sekundy, metru a kandelu) s účinností od 20. května 2019. Nově jsou všechny základní jednotky pevně navázány na vybrané fyzikální a technické konstanty, jejichž velikosti jsou touto dohodou fixovány, viz též schéma na obr. 1. Jedná se o následující konstanty:

- frekvence záření, které vzniká při přechodu atomu cesia 133 mezi dvěma hladinami velmi jemné struktury základního stavu $\Delta\nu_{Cs}$,
- rychlost světla ve vakuu c ,
- Planckova konstanta h ,
- elementární náboj e ,
- Boltzmannova konstanta k ,
- Avogadrova konstanta N_A ,
- světelná účinnost monochromatického záření o frekvenci 540 THz K_{cd} .



Obr. 1. Grafické vyjádření vztahů ve staré a nové definici základních jednotek SI (převzato z https://en.wikipedia.org/wiki/SI_base_unit, autor Emilio Pisanty)

V nové SI jsou tyto konstanty charakterizovány následovně: rychlost světla ve vakuu a Planckova konstanta jako fundamentální konstanty, Boltzmannova konstanta a Avogadrova konstanta jako konstanty úměrnosti, elementární náboj jako vazebná síla elektromagnetické interakce definovaná pomocí konstanty jemné struktury (s čímž si autoři dovolují nesouhlasit, toto platilo ve staré SI a v CGS, ale ne nyní), frekvence záření, které vzniká při přechodu atomu cesia 133 mezi dvěma hladinami velmi jemné struktury základního stavu jako atomový parametr, a konečně světelná účinnost monochromatického záření o frekvenci 540 THz jako technická konstanta.

Dvě z těchto konstant budou možná v nedaleké budoucnosti nahrazeny. Redefinice sekundy je velmi pravděpodobná již v relativně blízké budoucnosti [18]. Zde se pravděpodobně využije optická frekvence namísto mikrovlnné, tedy vhodný přechod dávající vyšší energii, tedy opět atomový parametr. To bude pravidlo asi i do vzdálené budoucnosti, ledaže bychom dospěli až ku Planckově škále, viz [7]. Rovněž na redefinici kandely na kvantovém základě se intenzivně pracuje.

Původní i nově schválené definice jsou uvedeny v tab. 1. Všimněme si zde též některých formálních změn. Výčet základních jednotek již nezačíná pietně metrem, ale sekundou. Žádná definice neobsahuje konstanty či základní jednotky, které by nebyly zavedeny výše. Uvádí-li definice odvozenou jednotku, je vždy rozepsána i pomocí základních jednotek, přičemž pouze steradián v definici kandely tvoří výjimku.

Nová filozofie SI definitivně řeší problém s člověkem vyrobenými artefakty (riziko poškození, drift, nerovný přístup k realizaci jednotky, nevhodnost pro velmi vysoké násobky či velmi malé díly jednotky) či vlastnostmi substancí (definice čistoty a izotopického složení, drift díky znečištění, nevhodnost pro extrémní rozsahy). Řeší i rozpor mezi definicí ampéru a praktickou realizací elektrických veličin přes konvenčně definované hodnoty Josephsonovy konstanty $K_J = 2e/h$ a von Klitzingovy konstanty $R_K = h/e^2$. Nová definice vůbec umožňuje plně oproštění elektrických veličin od závislosti na jednotce hmotnosti a důsledně využívá současných úspěchů kvantových metod v oboru, hlavně Josephsonova a kvantového Hallova jevu. Také se intenzivně pracuje na zdokonalování „single electron tunnelling“ pro realizaci ampéru, což by umožnilo kvantovou realizaci trojúhelníku elektrických veličin – ampéru, voltu a ohmu. Okamžitý přínos bude větší pro metrologii elektrických veličin než pro metrologii hmotnosti, kde obě kvantové realizace (Kibbleovy (wattové) váhy a projekt Avogadro (přesná křemíková koule), viz další kapitola) patří k těm nejnáročnějším experimentům vůbec a pro pár nejbližších let dokonce dojde k mírnému zvýšení nejistot těch nejpřesnějších kalibrací hmotnosti. Rovněž jednotka látkového množství se odpoutá od jednotky hmotnosti a bude dána přímo jako počet entit, což mnohem lépe vyhovuje potřebám metrologie chemických veličin. Nevýhodou zde ale je, že se poněkud narušuje dekadický charakter SI, kdy jedna částice odpovídá látkovému množství rovnému zhruba 1,660 5 yptomolu ($1 \text{ ymol} = 10^{-24} \text{ mol}$). Zato termodynamické jednotky budou nově závislé na jednotkách mechanických, ovšem s možností mnoha primárních realizací (akustická plynová termometrie, termometrie na bázi permittivity plynů, termometrie na bázi Dopplerova posuvu, termometrie na bázi Johnsonova šumu).

Jednotka	
Stávající definice	Navrhovaná definice
Sekunda	
Sekunda je doba trvání 9 192 631 770 period záření odpovídajícího přechodu mezi dvěma hladinami velmi jemné struktury základního stavu atomu cesia ^{133}Cs .	Sekunda, značka s, je SI-jednotka času. Je definována fixováním číselné hodnoty cesiové frekvence $\Delta\nu_{\text{Cs}}$, přechodové frekvence atomu cesia 133 v klidovém stavu při přechodu mezi dvěma hladinami velmi jemné struktury základního stavu, rovné 9 192 631 770, je-li vyjádřena v jednotce Hz, jež je rovna s^{-1} .
Metr	
Metr je vzdálenost, kterou urazí světlo ve vakuu za dobu 1/299 792 458 sekundy.	Metr, značka m, je SI-jednotka délky. Je definována fixováním číselné hodnoty rychlosti světla ve vakuu c rovné 299 792 458, je-li vyjádřena v jednotkách $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, kde sekunda je definována ve smyslu $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.
Kilogram	
Kilogram je jednotka hmotnosti; je rovna hmotnosti mezinárodního prototypu kilogramu.	Kilogram, značka kg, je SI-jednotka hmotnosti. Je definována fixováním číselné hodnoty Planckovy konstanty h rovné $6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34}$, je-li vyjádřena v jednotkách $\text{J} \cdot \text{s}$, což se rovná $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, kde metr a sekunda jsou definovány ve smyslu c a $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.
Ampér	
Ampér je stálý elektrický proud, který protéká dvěma rovnoběžnými nekonečně dlouhými vodiči o zanedbatelném průřezu umístěnými ve vakuu 1 m od sebe, jestliže mezi vodiči působí magnetická síla o velikosti $2 \cdot 10^{-7}$ newtonu na jeden metr délky vodiče.	Ampér, značka A, je SI-jednotka elektrického proudu. Je definována fixováním číselné hodnoty elementárního náboje e rovné $1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19}$, je-li vyjádřena v jednotce C, což se rovná $\text{A} \cdot \text{s}$, kde sekunda je definována ve smyslu $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.
Kelvin	
Kelvin, jednotka termodynamické teploty, je rovna zlomku 1/273,16 termodynamické teploty trojného bodu vody.	Kelvin, značka K, je SI-jednotka termodynamické teploty. Je definována fixováním číselné hodnoty Boltzmannovy konstanty k rovné $1,380\,649 \cdot 10^{-23}$, je-li vyjádřena v jednotkách $\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$, což se rovná $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, kde kilogram, metr a sekunda jsou definovány ve smyslu h , c a $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.
Mol	
Mol je látkové množství systému, který obsahuje stejný počet elementárních entit, kolik je atomů v 0,012 kg uhlíku ^{12}C .	Mol, značka mol, je SI-jednotka látkového množství. Jeden mol obsahuje přesně $6,022\,140\,76 \cdot 10^{23}$ elementárních entit. Toto číslo je fixovaná číselná hodnota Avogadrovy konstanty, N_{A} , je-li vyjádřena v jednotce mol^{-1} a je nazývána Avogadrovo číslo. Látkové množství, symbol n , systému je mírou počtu specifikovaných elementárních entit. Elementární entitou může být atom, molekula, iont, elektron nebo jakákoliv jiná částice či specifikovaná skupina částic.
Kandela	
Kandela je svítivost zdroje, který vydává monochromatické záření o frekvenci $540 \cdot 10^{12}$ Hz, jehož intenzita v daném směru je 1/683 wattů na steradián.	Kandela, značka cd, je SI-jednotka svítivosti v daném směru. Je definována fixováním číselné hodnoty světelné účinnosti monochromatického záření o frekvenci $540 \cdot 10^{12}$ Hz, K_{cd} , rovné 683, je-li vyjádřena v jednotkách $\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$, což se rovná $\text{cd} \cdot \text{sr} \cdot \text{W}^{-1}$ nebo $\text{cd} \cdot \text{sr} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^3$, kde kilogram, metr a sekunda jsou definovány ve smyslu h , c a $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.

Tab. 1. Původní i nově schválené definice základních jednotek SI

Dopady nové SI

Mezi další důsledky přechodu na novou SI patří kromě nezávislosti na komplexních či člověkem vytvořených strukturách i značná svoboda v realizaci jednotek. Základní jednotky mohou být realizovány kýmkoli a kdekoli. Tedy např. i na Měsíci aniž by bylo nutno létat kvůli obnově návaznosti do Sèvres (i když nutnost mezilaboratorních porovnání kvůli zajištění kvality zůstane i nadále). Odvozené jednotky mohou být (alespoň v principu) realizovány přímo z návaznosti na definiční konstanty, bez základních jednotek. Jednotky také budou definovány přes „celý“ svůj rozsah, a ne jako nyní např. teplota jen ve významných bodech s nutností interpolací a extrapolací. Jednotka bude moci být realizována pomocí zásadně odlišných experimentů (např. kilogram pomocí Kibbleových vah nebo křemíkové koule, viz níže), což umožní mezilaboratorní porovnání jen s velmi nízkou vzájemnou korelací, nebo i bez ní. Definice neobsahují žádnou „mise en pratique“ (uvedení do praxe, tj. konkrétní doporučený experimentální předpis), takže přesnost realizace jednotky se bude moci s pokrokem technologie volně zvyšovat. Přesto se samozřejmě předpokládá, že různé „mises en pratique“ budou i nadále vydávány.

Metody určení Planckovy konstanty (které se nyní v současné SI stávají primárními metodami určení hmotnosti) jsou stručně a s mnoha odkazy na speciální články popsány ve [19]. Pro informaci čtenáře chceme jen zdůraznit, že wattové váhy určovaly Planckovu konstantu přímo (při co nejpřesnější znalosti hmotnosti závaží na vahách a co nejpřesnějším měření pohybu ramen váhy, místního tíhového zrychlení a elektrických veličin pomocí Josephsonova a kvantového Hallova jevu). Experiment s přesnou koulí z téměř dokonalého monokrystalu téměř izotopicky čistého křemíku vlastně určuje Avogadrovu konstantu, ale Planckovu konstantu z něj lze odvodit při uvážení následujících vztahů.

Planckova a Rydbergova konstanta jsou spolu svázány rovnicí

$$h = \frac{m_e c}{2R_\infty} \alpha^2, \quad (1)$$

kde m_e je hmotnost elektronu a α konstanta jemné struktury.

Zároveň je jedním z možných vyjádření Avogadrovu konstanty

$$N_A = \frac{M_P}{m_p}, \quad (2)$$

kde M_P je molární hmotnost protonu a m_p hmotnost protonu.

Kombinací obou rovnic získáváme vztah

$$hN_A = c \frac{\alpha^2}{2R_\infty} \frac{m_e}{m_p} M_P, \quad (3)$$

kde c je určeno přesně a ostatní parametry na pravé straně známe všechny s relativní nejistotou lepší než $1 \cdot 10^{-9}$.

Určením Avogadrovu konstanty pomocí hmotnosti a objemu křemíkové koule, mřížkové konstanty a molární hmotnosti křemíku tedy určíme i Planckovu konstantu (nebo naopak nyní po redefinici hmotnost).

Zapomenout nesmíme ani na změny hodnot ostatních fyzikálních konstant. Touto redefinicí SI se staly přesně určenými též Wienova, Stefanova–Boltzmannova, Josephsonova, von Klitzingova, Faradayova a molární plynová konstanta. Musíme mít též na zřeteli vztah

$$\mu_0 = 2 \frac{h\alpha}{e^2 c}. \quad (4)$$

Doposud přesně známá permeabilita vakua bude nyní mít stejnou relativní nejistotu, jakou má konstanta jemné struktury, což platí i pro permitivitu vakua. Nejistota, s jakou jsme před redefinicí znali Planckovu konstantu, se přenesla na nejistotu do té doby přesné hmotnosti mezinárodního prototypu kilogramu – odtud pramení dočasně zhoršení špičkových kalibrací hmotnosti. Rovněž nejistota, s jakou jsme před redefinicí znali Boltzmannovu konstantu, se přenesla na nejistotu do té doby přesné teploty trojného bodu vody, což však při používání stupnice ITS-90 nebude mít praktické dopady.

Nová SI ale přináší i další problémy. Např. současné experimentální realizace vyžadují značné investice i know-how. Bylo již zmíněno, že po dobu několika let bude nutno smířit se s dočasným zvýšením nejistot špičkových kalibrací hmotnosti (znatelné u závaží třídy E1), k němuž se přičítají i problémy s transferem závaží mezi vakuem a atmosférou při užití wattových vah. Zároveň ale lze předpokládat, že právě podoba nové SI umožní rychlejší pokrok experimentální fyziky a většina těchto problémů se brzy zlepší. V neposlední řadě nové definice nejsou intuitivní a vyžadují přinejmenším základní znalost fyziky.

Zároveň je třeba podotknout, že kromě zásadní změny popsané výše jsou zde i další drobné novinky. Např. výčet jednotek povolených k používání spolu s jednotkami soustavy SI se značně zúžil. Nyní se neuvádí nejen třeba námořní míle a uzel, ale i v našich podmínkách hojně užívaný bar a milimetr rtuti. Některé z nich ale zatím zůstávají v dalších autoritativních dokumentech, jako jsou série norem ISO/IEC 80000 či direktiva EU 80/181/EC. Rovněž soustavy CGS definitivně přestanou být kompatibilní s SI [19] a doufejme, že to urychlí jejich odchod na zasloužený odpočinek.

Tento kompletní přechod na definitorické konstanty je pro SI opravdu revoluční, ale myšlenka to vůbec není nová, jak ukážeme v následující kapitole.

Stručná historie návrhů soustavy jednotek založené na fyzikálních konstantách

Způsob definice základních jednotek se postupem času měnil. Původní metrická soustava z konce 18. stol. vycházela z demokratického principu všeobecného rovného přístupu k realizaci jednotek nezávisle na jednotlivých státech či jiných lidských společnostech. Definice se opíraly o všem stejně dostupné fyzikální objekty a procesy, což na přelomu 18. a 19. stol. byl především tvar a pohyby Země, tedy konstanty v rámci tehdejších přesností měření. Při zavedení Metrické konvence v roce 1875 se však využilo člověkem vytvořených artefaktů kilogramu a metru.

První (a předčasný) návrh využít konstantu vyskytující se ve fyzikálním zákoně (v konečném důsledku rychlost světla ve vakuu) v základech systému jednotek byl publikován již roku 1857, viz [13].

Později přišly tzv. přirozené soustavy jednotek, které jsou bezrozměrové a jsou založeny na zvolených fyzikálních konstantách; ty jsou definitoricky rovny jedné. Těchto

soustav je celá řada a postupně se objevovaly od roku 1874, viz [1]. Nejznámější z nich je soustava Planckova z roku 1899, jež v původní podobě vycházela z rychlosti světla, Planckovy konstanty, gravitační konstanty, permitivity vakua (ve tvaru $1/4\pi\epsilon_0$) a Boltzmannovy konstanty. Tyto soustavy však odpovídají potřebám jednotlivých teoretických oborů a jejich vznik nebyl motivován snahou o vytvoření prakticky použitelné univerzální soustavy jednotek, viz též [21].

Od roku 1960 do roku 1983 byl metr definován jako jistý násobek vlnové délky záření šířícího se ve vakuu a příslušejícího určitému přechodu mezi energetickými hladinami atomu kryptonu 86. Od roku 1967 je sekunda definována pomocí frekvence záření, které vzniká při přechodu atomu cesia 133 mezi dvěma hladinami velmi jemné struktury základního stavu. Tato definice je stále platná. Tuto konstantu nazývá SI atomový parametr a závisí nejen na fundamentálnějších fyzikálních konstantách, ale i na okolních podmínkách. Zhruba platí [15]

$$\Delta\nu_{Cs} \sim m_e c^2 \frac{1}{h} \alpha^4 \frac{m_e}{m_p} g_I, \quad (5)$$

kde g_I je jaderný g-faktor.

S rozvojem experimentální fyziky se však začalo uvažovat o mezinárodní soustavě jednotek založené na fyzikálních konstantách (samozřejmě s číselnými faktory udržujícími zavedené velikosti jednotek). Nejstarší návrh, který se autorům podařilo dohledat, představil v roce 1972 Cook [4]. Ve svém článku uvažoval tři varianty, jak pomocí fixování hodnot vhodných fyzikálních konstant určit pět základních jednotek (nezabýval se svítivostí a teplotou). Jednotlivé verze využívají různých výběrů z těchto konstant: rychlost světla ve vakuu, Planckova konstanta, hmotnost elektronu, elementární náboj, frekvence záření cesia 133, Avogadrova konstanta, permitivita vakua a magnetický moment protonu. Možnost realizovat hmotnost přes čistý křemíkový monokrystal navrhl v roce 1974 Deslattes s kolegy [5].

Roku 1983 byla jednotka metr definována pomocí zafixování hodnoty rychlosti světla ve vakuu, což částečně uvedlo tyto ideje do SI, přičemž dlouhá léta praxe potvrdila správnost této volby. Je však třeba zároveň si uvědomit, že ve verzi SI platné až do 20. května 2019 definice ampéru sice definovala hodnotu permeability vakua, zároveň však závisela na definici kilogramu, obdobně i kandela. Dále je třeba zdůraznit, že Josephsonova konstanta a von Klitzingova konstanta v době redefinice také měly konvenčně definované hodnoty paralelně k SI, což platilo též i pro hodnotu součinu relativní atomové hmotnosti ^{12}C a molární hmotnostní konstanty $A_r(^{12}\text{C}) \cdot M_u$.

Roku 1991 pak Taylor nastínil dva scénáře [20], jak pokračovat v započaté cestě. První, který se snaží ponechat co nejvíce z původní SI, zavádí pouze definici jednotky hmotnosti přes hmotnost elektronu (plus nový název pro kilogram a novou velikost molu). Druhý naopak závisí na fixování Josephsonovy konstanty a permitivity vakua namísto permeability.

Dále přišel již zmiňovaný návrh nové SI. Již na 21. zasedání CGPM v roce 1999 byla přijata rezoluce č. 7, jež doporučuje národním laboratořím pokračovat v úsilí o zdokonalení experimentů, jež vztahují jednotku hmotnosti k fundamentálním nebo atomovým konstantám (viz [8]). Tato výzva byla dále rozvinuta na 23. zasedání CGPM v roce 2007 (viz [9]), na 24. zasedání v roce 2011 (viz [10]) a na 25. zasedání v roce 2014 (viz [11]). Oficiální návrh je asi nejpodrobněji (a s velkým množstvím odkazů)

diskutován v [14], kde se objevuje i diskuze o možnosti definovat kilogram přes Avogadrovu konstantu, ale autoři zmíněného článku se jednoznačně staví za upřednostnění Planckovy konstanty. Spekuluje se zde i o možné budoucí redefinici sekundy přes Rydbergovu konstantu. Tento článek rovněž rozebírá důsledky redefinice, jež vlastně nahradí soustavu základních jednotek soustavou generujících konstant, přičemž dále je tento problém probírán z obecnějšího hlediska v [16]. Zde je na místě poznamenat, že tento oficiální návrh samozřejmě doprovázela širší diskuze. Zajímavé je přejít si např. [2], kde se autoři v široké diskuzi, zda jednotku hmotnosti definovat pomocí Planckovy konstanty nebo atomové hmotnostní konstanty, přiklání spíše ke druhé možnosti. Konečně je nutno zmínit i článek [3], jenž spekuluje o některých dalších (v ostatních návrzích opomíjených) tématech. Jedná se o možnou budoucí redefinici sekundy přes Rydbergovu konstantu nebo hmotnost elektronu a důraz na vztah mechanických a elektrických veličin (jakoby návrat k CGS, ovšem nyní zdůrazňující, že veličiny popisující základní fyzikální síly lze odvodit z veličin mechaniky za použití bezrozměrových vazebných konstant jako je konstanta jemné struktury nebo gravitační vazební konstanta).

V roce 2015 pak byl publikován neúspěšný protinávrh částečně navazující na [2] přímo z týmu pracovníků BIPM [6], kteří se více drží tradiční podoby SI, tj. namísto zafixování Planckovy konstanty a elementárního náboje upřednostňují fixování atomové hmotnostní konstanty a ponechání permeability vakua, zatímco s Boltzmannovou a Avogadrovou konstantou souhlasí a svítivosti se nevěnují.

Závěr

Další informace lze najít na webu Českého metrologického institutu¹, příspěvkové organizace zřízené Ministerstvem průmyslu a obchodu, nebo přímo na stránkách BIPM². Ministerstvo průmyslu a obchodu finančně podpořilo přípravu na realizaci nově definovaných jednotek SI již v r. 2018 pomocí Programu redefinice jednotek Českého metrologického institutu částkou třiceti milionů korun a předpokládá se, že aktivní podpora bude pokračovat i v dalších letech tak, aby byla zajištěna hladká realizace přechodu na nové definice v rámci České republiky k termínu jejich účinnosti.

Český metrologický institut nemá v současnosti ambice budovat Kibbleovy váhy nebo pořizovat kouli z izotopicky čistého křemíku. Pracuje ale na zajištění přenosu jednotky z těchto primárních metod na své etalony rozvojem vážení ve vakuu a transportu etalonových závaží pod vakuem. Jednotka ampér bude i nadále realizována přes napětí a odpor na bázi Ohmova zákona, neboť metody SET – single electron tunneling – dosud neřeší proudy nad 100 pA – potřebné primární etalony napětí a odporu na bázi Josephsonova a von Klitzingova jevu již ČMI provozuje. Před dokončením je společný primární etalon délky a času na bázi tzv. optických hodin, které se stanou základem pro redefinici jednotky času sekundy v příštích letech. Do budoucna se dále zvažuje vývoj primární termometrie na bázi Johnsonova šumu.

¹www.cmi.cz

²www.bipm.org

L i t e r a t u r a

- [1] BARROW, J. D.: *Natural units before Planck*. Quart J. R. Astronom. Soc. 24, 24–26.
- [2] BECKER, P., DE BIÈVRE, P., FUJII, K., GLAESER, M., INGLIS, B., LUEBBIG, H., MANA, G.: *Considerations on future redefinitions of the kilogram, the mole and other units*. Metrologia 44 (2007), 1–14.
- [3] BORDÉ, C. J.: *Base units of the SI, fundamental constants and modern physics*. Philos. Trans. A 363 (2005), 2177–2201.
- [4] COOK, A. H.: *Quantum metrology – standards of measurement based on atomic and quantum phenomena*. Rep. Progr. Phys. 35 (1972), 463–528.
- [5] DESLATTES, R. D., et al.: *Determination of the Avogadro constant*. Phys. Rev. Lett. 33 (1974), 463–466.
- [6] FLETCHER, N., DAVIS, R. S., STOCK, M., MILTON, M. J. T.: *Modernizing the SI – implications of recent progress with the fundamental constants*. Dostupné z: arXiv:1510.08324. (2015), 12 pp.
- [7] GÜTTLER, B., et al.: *Amount of substance and the mole in the SI*. Metrologia 56 (2019), 044002, 14 pp.
- [8] <http://www.bipm.org/en/CGPM/db/21/7/>
- [9] <http://www.bipm.org/en/CGPM/db/23/12/>
- [10] <http://www.bipm.org/en/CGPM/db/24/1/>
- [11] <http://www.bipm.org/en/CGPM/db/25/1/>
- [12] KLENOVSKÝ, P.: *Nové definice základních jednotek soustavy SI*. Metrologie 28 (2019), 18–21.
- [13] MENDELSON, K. S.: *On an early proposal for a unified system of units*. Amer. J. Phys. 83, 183–185.
- [14] MILLS, I. M., MOHR, P. J., QUINN, T. J., TAYLOR, B. N., WILLIAMS, E. R.: *Redefinition of the kilogram, ampere, kelvin and mole: a proposed approach to implementing CIPM recommendation 1 (CI-2005)*. Metrologia 43 (2006), 227–246.
- [15] MOCKLER, R. C.: *Atomic beam frequency standards*. Adv. Electronics and Electron Phys. 15 (1961), 1–71.
- [16] MOHR, P. J.: *Defining units in the quantum based SI*. Metrologia 45 (2008), 129–133.
- [17] MOHR, P. J., NEWELL, D. B., TAYLOR, B. N., TIESINGA, E.: *Data and analysis for the CODATA 2017 special fundamental constants adjustment*. Metrologia 55 (2018), 125–146.
- [18] RIEHLE, F., GILL, P., ARIAS, F., ROBERTSSON, L.: *The CIPM list of recommended frequency standard values: guidelines and procedures*. Metrologia 56 (2019), 044002, 14 pp.
- [19] STOCK, M., DAVIS, R., DE MIRANDÉS, E., MILTON, M. J. T.: *The revision of the SI – the result of three decades of progress in metrology*. Metrologia 56 (2019), 022001, 14 pp.
- [20] TAYLOR, B. N.: *The possible role of the fundamental constants in replacing the kilogram*. IEEE Trans. Instrumentation Measurement 40 (1991), 86–91.
- [21] TOMILIN, K. A.: *Natural systems of units*. In: Proc. of the XXII Workshop on high energy physics and field theory, 287–296.
Dostupné z: <http://www.ihst.ru/personal/tomilin/papers/tomil.pdf>