

SISTEM ENOT NA POTI DO SPREMEMB

JANEZ STRNAD

Fakulteta za matematiko in fiziko

Univerza v Ljubljani

PACS: 06.20.fa, 06.30.Dr

Kopičijo se razlogi za večje spremembe v Mednarodnem sistemu enot SI. Odbori, v katerih o spremembah razpravljajo, priporočajo, naj bo javnost o predlogih čim bolje obveščena.

THE SYSTEM OF UNITS ON THE WAY TO CHANGES

Arguments for substantial changes of the International System of Units SI accumulate. Committees, within which the possible changes are discussed, recommend that the public should be maximally informed of the proposals.

Resolucija

Lanskega oktobra je bilo na sedežu Mednarodnega urada za uteži in mere BIPM v Sèvresu blizu Pariza 24. zasedanje Generalne konference za uteži in mere CGPM. Na njem so sprejeli Resolucijo 1 *O mogoči prihodnji spremembi Mednarodnega sistema enot SI* [1]. Nekateri razglašajo predloge za „največje spremembe sistema enot po francoski revoluciji“. Mednarodni odbor za uteži in mere CIPM, Posvetovalni odbor za enote CCU in sam BIPM priporočajo, da naj bosta o novih zamislih čim bolj obveščeni „znanstvena in uporabniška skupnost, da bi lahko ob pravem času upoštevali odzive in poglede“ na podlagi široke razprave.

Za bralce Obzornika povzemimo glavne misli iz premišljeno sestavljene resolucije, ki jo je na spletu vredno prebrati. Za uspešen zgled velja dogovor o metru iz leta 1983, ki je meter opredelil prek določene vrednosti za hitrost svetlobe v praznem prostoru. Največjo skrb povzroča dogovor o kilogramu, ki še edini sloni na izdelku človeških rok. Kaže, da se masa prakilograma, uradno Mednarodnega prototipskega kilograma IPK, ki ga v Sèvresu hranijo v kleti pod tremi povezniki in uporabijo „neposredno po čiščenju in umivanju na predpisan način“, s časom spreminja (slika 1). Tudi kilogram bi kazalo povezati s katero od „invariant narave – z osnovno fizikalno konstanto ali lastnostjo atomov“. Dogovor o kilogramu vpliva tudi na dogovore o amperu, molu in kandeli.

Že na 21. zasedanju Generalne konference leta 1999 so priporočili državnim metrološkim laboratorijem, „naj nadaljujejo prizadevanje, da bi poskusi, ki povezujejo enoto za maso z osnovnimi ali atomskimi konstantami,

postali natančnejši in bi bilo v prihodnosti mogoče spremeniti dogovor o kilogramu“. Odtlej so po vmesnih korakih prišli do osnutkov za predloge o novih dogovorih, ki jih razčlenjuje Resolucija.

- Enota za maso je kilogram, katerega velikost je povezana z določeno vrednostjo Planckove konstante $h = 6,626\,06X \cdot 10^{-34}$ Js.
- Enota za tok je amper, katerega velikost je povezana z določeno vrednostjo osnovnega naboja $e_0 = 1,602\,17X \cdot 10^{-19}$ As.
- Enota za temperaturo je kelvin, katerega velikost je povezana z določeno vrednostjo Boltzmannove konstante $k = 1,380\,6X \cdot 10^{-23}$ J/K.
- Enota za množino snovi je mol, katerega velikost je povezana z določeno vrednostjo Avogadrove konstante $N_A = 6,022\,14X \cdot 10^{23}$ /mol.

Pri tem X na zadnjem mestu zaznamuje „mesto ali dve, ki ju bodo dodali najnovejši podatki CODATA“. ¹ Tako se v dogovoru o kelvinu ne bi bilo več treba sklicevati na lastnosti vode.

Dogovori za preostale tri enote ostanejo v bistvu nespremenjeni.

Enota za čas je sekunda, katere velikost je določena kot 9 192 631 770 nihajnih časov elektromagnetnega valovanja pri prehodu med stanjema, na kateri je razcepljeno osnovno stanje atoma cezija 133 v mirovanju pri temperaturi 0 K. Enota za svetilnost v dani smeri je kandela, katere velikost je povezana z določeno vrednostjo razmerja med fiziološko in fizikalno enoto za svetilnost 683 lm/W za enobarvno sevanje s frekvenco $540 \cdot 10^{12}$ s⁻¹.

Če bi bili ti dogovori sprejeti, nekateri podatki ne bi bili več natančni. Kilogram bi bil po novem določen enako natančno kot Planckova konstanta. Magnetna konstanta (indukcijska konstanta) μ_0 bi bila določena enako natančno kot konstanta fine strukture $\alpha = e_0^2/(4\pi\epsilon_0 c \hbar)$ s $\hbar = h/(2\pi)$.

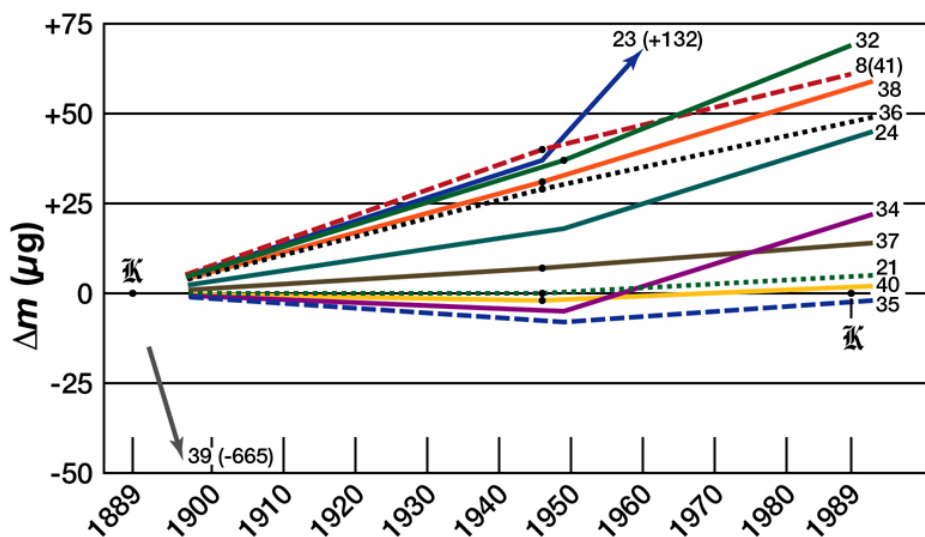
Molska masa ogljika ¹²C bi bila določena enako natančno kot produkt $N_A h$.

¹Delovna skupina za osnovne konstante CODATA od leta 1973 objavlja preglednice priporočenih vrednosti osnovnih fizikalnih konstant, v zadnjem času v Reviews of Modern Physics. Zadnja preglednica je izšla leta 2008 in je zajela merjenja do leta 2006. Konec marca 2012 so P. J. Mohr, B. N. Taylor in D. N. Newell poslali v tisk dolg članek *CODATA recommended values of the fundamental physical constants 2010*. Podatke zanj so zbirali od začetka leta 2007 do konca leta 2010. Za zdaj ga je mogoče prebrati na spletnem naslovu arXiv:1203.5425v1. Članek vsebuje za navedene konstante naslednje vrednosti: Planckova konstanta $6,62606957(20) \cdot 10^{-34}$ Js, osnovni naboj $1,602176565(35) \cdot 10^{-19}$ As, Boltzmannova konstanta $1,3806488(13) \cdot 10^{-23}$ J/K, Avogadrova konstanta $6,02214129(27) \cdot 10^{23}$ /mol. Navada je, da pri osnovnih konstantah v oklepaju navedejo negotovost na zadnjih dveh mestih.

Kilogram proti kilogramu

Za dogovor o kilogramu tekmujeta *elektronski kilogram* in *Avogadrov kilogram*. Kot kaže, Resolucija stavi na prvega, ki je določen preko Planckove konstante. Uresničili bi ga z *vatsko tehtnico*. Večje tehtnice te vrste delujejo v ameriškem Državnem inštitutu za standarde in tehnologijo NIST, v angleškem Državnem fizikalnem laboratoriju NPL, v švicarskem Zveznem uradu za metrologijo in akreditacijo METAS, v Mednarodnem uradu za uteži in mere BIPM in v francoskem Državnem laboratoriju za metrologijo in standarde LNE. Zamisel izhaja iz Ampèrove tehtnice, na kateri je nekdanj temeljil dogovor o amperu. Na raven vodnik s tokom I in dolžino l deluje pravokotno magnetno polje z gostoto B s silo $F = IlB$. V resnici tehtnice nista sestavljala vzporedna ravna vodnika, ampak tuljavi s skupno geometrijsko osjo. Težavno je bilo natančno ugotoviti velikost tuljav in njuno razdaljo.

Težavo je obšel Bryan P. Kibble s predlogom leta 1975. V prvem koraku s tokom v danem magnetnem polju uravnovesijo težo kilogramske uteži



Slika 1. Skupaj s prakilogramom so izdelali več enakih prototipov. Mase nekaterih od teh so ob treh priložnostih primerjali z maso prakilograma. Ta je po dogovoru natanko en kilogram in se ne spreminja ($K - K$). Po spremembah mase drugih etalonov, ki so zaznamovani z zaporednimi številkami, pa je mogoče sklepati, da se tudi masa prakilograma spreminja. Mase vseh prototipov ob izdelavi leta 1889 so vzeli za enake.

Vir: <http://en.wikipedia.org/wiki/Kilogram>.

$mg = IlB$. V drugem koraku se vodnik po tem magnetnem polju premika s hitrostjo v in izmerijo inducirano napetost $U = lvB$. Iz obeh enačb sledi zveza $m = UI/(gv)$. Produkt UI ima enoto watt, kar je tehničari dalo ime. Tok in napetost izmerijo prek kvantnega Hallovega pojava s von Klitzingovo konstanto $R_K = h/e_0^2$ in prek Josephsonovega pojava z Josephsonovo konstanto $K_J = 2e_0/h$. Obe konstanti dasta Planckovo konstanto $h = 4/(K_J^2 R_K)$.

Za zdaj je najnatančnejša tehcnica v NIST [2]. Naprava je v dvonadstropni stavbi iz lesa brez kovinskih delov, da se izognejo elektromagnetnim motnjam. Tehcnica je tako občutljiva, da je treba upoštevati vpliv plimovanja. Uporabljajo superprevodni magnet. Tuljava se giblje v vakuumu, da se izognejo zračnemu upor. Izmerili so Planckovo konstanto $h = 6,62606901(34) \cdot 10^{-34}$ Js z relativno negotovostjo $5 \cdot 10^{-8}$ [2].

Na drugi strani pri *Avogadrovem načrtu* sodeluje osem velikih metroloških laboratorijev in še druge ustanove z vsega sveta [3]. Izbrali so silicij, ki ga je mogoče dobiti zelo čistega. Naravni silicij sestavljajo trije izotopi 28 (92,2 %), 29 (4,7 %) in 30 (3,1 %). Zaradi težave z izotopsko sestavo so se odločili za obogatitev. V prečiščenem silicijevem hidridu so povečali delež najlažjega izotopa na 99,985 %. Iz njega so pridobili trden silicij in vzgojili velik monokristal. Iz kristala so izrezali dve krogli z maso po 1 kg in premerom 9,37 cm. Krogli so podrobno premerili in preverili njuno izotopsko sestavo in kristalno zgradbo. Pri merjenju so tako dobili dve vrsti podatkov, ki so jih lahko primerjali med seboj. Z rentgensko svetlobo so ugotovili razdaljo med sosednjima atomoma v kristalu. S tem so izračunali število silicijevih atomov v kroglih. Kristalizacija je delovala kot „ojačevalnik z majhnimi motnjami“ tako, da so se izognili neposrednemu štetju atomov. Nazadnje so dobili za Avogadrovo konstanto $N_A = 6,022\,140\,78(18) \cdot 10^{23}$ /mol, ki ji ustreza relativna negotovost $3,0 \cdot 10^{-8}$. Pri merjenjih z vatsko tehcnico naj bi na NIST dosegli že relativno negotovost $3,6 \cdot 10^{-8}$. Po dogovoru Generalna konferenca ne namerava predlagati dokončnih sprememb, preden relativne negotovosti ne bodo zmanjšali pod $2 \cdot 10^{-8}$.

Po pričakovanju sta se oblikovali dve skupini. Tisti, ki stavijo na električna merjenja, se zavzemajo za „elektronski“ dogovor, tisti, ki mislijo na število atomov, pa za „Avogadrovega“ [4]. CIPM je priporočil: „Ker je pomembno, da o osnovah našega sistema enot poučujemo v šolah in na univerzah, je zaželeno, da so definicije osnovnih enot razumljive za študente vseh strok, kolikor to dopušča sodobno naravoslovje.“ Nekateri zagotavljajo, da je „elektronski“ dogovor zapleten in številni šolarji ne poznajo Planckove konstante. Zato predlagajo dogovor: kilogram je $844466889^3 \cdot 1000$ atomov ogljika 12, ki niso vezani in mirujejo v osnovnem stanju [5]. Tak dogovor s celim številom atomov naj bi šolarji lažje razumeli. Zagotovo bo razprava še

vroča. Že zdaj v strokovnih revijah številni članki zagovarjajo eno ali drugo možnost. Generalna konferenca se ponavadi sestaja na štiri leta, naslednji sestanek pa načrtujejo že leta 2014. Tedaj lahko pričakujemo prve sklepe.

LITERATURA

- [1] Resolution 1 of the 24th of the CGPM (2001)
<http://www1.bipm.org/en/CGPM/db/24/1/>.
- [2] R. L. Steiner, E. R. Williams, D. B. Newell, R. Liu, *Towards an electronic kilogram: an improved measurement of the Planck constant and electronic mass*, *Metrologia* **42** (2005), 431–441.
- [3] B. Andreas in drugi, *An accurate determination of the Avogadro constant by counting the atoms in a ^{28}Si crystal*, *Phys. Rev. Lett.* **106** (2011) 030801.
- [4] R. P. Crease, *Metrology in the balance*, *Physics World* **24** (2011), 39–45 (3).
- [5] T. P. Hill, J. Miller, A. C. Cesullo, *Towards a better definition of the kilogram*, *Metrologia* **48** (2011), 83–86.

VESTI

STROKOVNA EKSURZIJA

Društvo matematikov, fizikov in astronomov Slovenije organizira v soboto, 22. septembra 2012, strokovno ekskurzijo na Avstrijsko Koroško. Ta bo vključevala tudi nekaj kulturnega programa. Avtobusni prevoz bo sponzoriralo DMFA.

Če želite prejemati nadaljnja obvestila, prosim, da to sporočite čim prej na naslov: Mitja.Rosina@ijs.si. Obenem se lahko tudi preliminarno (neobvezujoče) prijavite; prijave bodo možne tudi pozneje.

Okvirni program:

- *hiša eksperimentov* (fizika na igrišču) v Kočuhi pri Borovlju
- *Planetarij* v Celovcu,
- *Goršetova galerija* v Svečah,
- *Kraigherjeva galerija* v Bistrici v Rožu,
- (morda tudi Minimundus in živalski vrt plazilcev v Celovcu).

Prisrčno vabljeni!

Mitja Rosina

<http://www.obzornik.si/>