

REDEFINICIJE ENOT SI

ALEŠ MOHORIČ

Fakulteta za matematiko in fiziko, Univerza v Ljubljani
Odsek za fiziko trdne snovi, Institut Jožef Stefan, Ljubljana

PACS: 06.20.fa, 06.20.Jr

Sistem merskih enot mora biti notranje skladen, omogočati mora merjenje vseh fizikalnih količin, definicije osnovnih enot morajo temeljiti na naravnih konstantah in velikosti osnovnih enot se ne smejo spremeniti. To so bila osnovna vodila redefinicij osnovnih enot SI, ki stopajo v veljavo maja 2019.

REDEFINITION OF SI UNITS

System of units must be self consistent, it must enable measurements of all quantities, definitions of base units must be based on natural constants and their magnitudes must not change. These were the basic principles leading to the redefinitions of the base units of international system of units, which come into force in May 2019.

Uvod

Enote potrebujemo za merjenje fizikalnih količin¹. Točno in natančno merjenje je pomembno npr. v tehniki, prometu, trgovini in osnovnih raziskavah. Količino izmerimo tako, da jo (vsaj posredno, z umerjenim merilnikom) primerjamo z ustrezno enoto. Enota je dogovorjena in definirana vrednost količine. Definicijo enote realiziramo s predmetom ali postopkom, da dobimo etalon, zelo natančno merilo, s katerim nato umerjamo bolj razširjena in manj natančna merila v verigi zaporednih primerjav. Za to, da so merjenja v Sloveniji primerljiva in mednarodno usklajena, imamo vzpostavljen nacionalni meroslovni sistem, za katerega skrbi Urad RS za meroslovje. Nacionalni meroslovni sistem zagotavlja sledljivost meritev na mednarodno raven in natančna merila za uporabo v trgovini, industriji, javni upravi in na znanstvenem področju. Mednarodno usklajenost merskih enot pa ureja t. i. Metrska konvencija, ki je bila podpisana leta 1875 kot ena izmed prvih mednarodnih konvencij.

Sistem enot mora biti koherenten, notranje usklajen. Naravni pojavi so povezani s fizikalnimi zakoni in to moramo upoštevati pri definiciji enot. Mednarodni sistem enot SI ne predstavlja edinega smiselnega nabora osnovnih enot. Znan je kvantnomehanski sistem naravnih enot, kjer imata naravni konstanti, hitrost svetlobe in Planckova konstanta, vrednost (in enoto) 1.

¹Fizikalne količine so v standardih in meroslovju znane kot veličine [4].

Tak sistem ima le eno osnovno enoto in običajno izberejo meter. Na ta način je čas enakovredna koordinata v prostor-času. Enote za silo, energijo ipd. pa so ustrezne potence osnovne enote. Drugi zgled za koherentno definicijo enot najdemo v elektromagnetizmu. Tradicionalne enote so naslonjene na enote za dolžino, maso in čas, ker so jih že od nekdaj uporabljali in znali meriti, električne količine pa niso imele ekvivalentnih tradicionalnih enot. Osnovni zakon elektrostatičnosti, Coulombov zakon, povezuje električni naboj q s silo: $F r^2 = k_1 q q'$. Z izbiro enote za naboj določimo enoto za konstanto k_1 . Preko Amperovega zakona lahko silo na enoto dolžine vzporednih vodnikov, v katerih teče tok, zapišemo $\frac{dF}{dl} = 2k_2 \frac{II'}{r}$. Dvojka je dodana konstanti zaradi lepšega rezultata, ki sledi kasneje. Tu bi lahko izbrali enoto za tok po želji in s tem določili enoto konstante k_2 . Očitno velja zveza med konstantama k_1 in k_2 tako, da ima njun kvocient enoto kvadrata hitrosti in njuni velikosti (in s tem enoti za naboj in tok) lahko povežemo tako, da za hitrost zahtevamo vrednost svetlobne hitrosti $\frac{k_1}{k_2} = c^2$. Če za induk-

cijski zakon $\nabla \times \vec{E} + k_3 \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0$ izberemo sorazmernostno konstanto k_3 , lahko pokažemo, da je magnetno polje v okolici ravnega vodnika podano z $B = \frac{2k_2 I}{k_3 r}$. Izbire različnih električnih enot lahko poenostavijo določene račune in od sistemov sta najbolj znana SI in Gaussov sistem, za katera je po vrsti: $k_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$, $k_2 = \frac{\mu_0}{4\pi}$, $k_3 = 1$ in $k_1 = 1$, $k_2 = c^{-2}$, $k_3 = c^{-1}$. V Gaussovem sistemu imata tako npr. jakost električnega polja in gostota magnetnega polja enaki enoti.

Nekdaj so enote temeljile na človeku bližnjih, dostopnih predmetih ali pojavih, kot so npr. širina palca, dolžina lakta ali stopala, masa zrna pšenice, dolžina dneva [2]. Pred francosko revolucijo je evropski merski sistem temeljil na sistemu, ki ga je po antično rimskih merah po celem cesarstvu vpeljal Karel Veliki. Po njegovi smrti se je cesarstvo razdrobilo in številni vladarji so vpeljali svoje različice merskih enot. Nekateri karolinški enote, kot npr. kraljevi stop (čevelj, pied du Roi), se praktično niso spreminjale tisoč let, medtem ko so se druge, npr. vatel (za merjenje dolžine blaga) in funt, močno razlikovale od kraja do kraja. Do francoske revolucije je število različnih sistemov in enot naraslo v nepregledno množico. Dostopnost do raznih enot je bila omejena in neusklajenost med različnimi skupnostmi je povzročala težave, ki so jih skušali reševati z dogovori. Znan je 25. člen angleške Magne Carte iz leta 1215, ki je zahteval, da se po vsem angleškem kraljestvu uporablja enake standarde merjenja. Leta 1707 so angleške enote prevzeli tudi Škoti. Peter Veliki je želel vzpodbuditi trgovino z zahodom in je v 18. stoletju vpeljal angleški sistem enot tudi v ruskem carstvu. Od 1668 do 1776 je bil francoski dolžinski standard toise (klafta ali seženj, z dolžino enako šestim stopam ali 72 palcem ali 864 linijam (lignes), slaba

dva metra). Leta 1735 so na ta standard umerili perujsko klaftro, geodetski standard, ki so ga uporabljali na špansko-francoski geodetski odpravi v Južno Ameriko. Perujska klafta je 1766 postala uradna francoska enota za dolžino, znana kot Toise de l'Académie. Izpostaviti je treba trud Francozov, ki so začeli pripravljati enotni sistem temelječ na vsem dostopnih naravnih pojavih, npr. obsegu Zemlje, trajanju dneva, masi litra vode. Leta 1799, po izmeri pariškega poldnevnikarja od Dunquerqua do Barcelone, ki sta jo izvedla Jean-Baptiste Joseph Delambre in Pierre Mechain, so meter definirali kot desetmilijonino razdalje od severnega pola do ekvatorja, kar je nanese 3 stope in 11,296 linij. Za enoto mase so predlagali kilogram kot maso tisočine kubičnega metra čiste vode. Čeprav so definicije izbrali tako, da si nihče ne bi mogel lastiti enot, jih niso mogli uporabiti dovolj pripravno in natančno. Zato so enoti realizirali z *mètre des Archives* in *kilogramme des Archives*, ki sta bila najboljša poskusa realizacije definicij. Čeprav so Francozi želeli razširiti nove enote in so k sodelovanju povabili Britance in Američane, so prototipe izdelali leta 1799 sami. Švicarji so prevzeli metrični sistem leta 1803 in leta 1805 je švicarski imigrant Ferdinand Rudolph Hassler prinesel kopiji metra in kilograma v Združene države, kjer pa je kongres leta 1830 potrdil britanski standard iz leta 1758, meter pa so uporabljali le za geodetska merjenja. Med 1840 in 1871 je metrski sistem sprejelo še več držav, Francija, Avstro-Ogrska (mi), Španija, južnoameriške republike, italijanske in nemške države. Nizozemska je sprejela sistem že leta 1817. Od 1863 so gram uporabljali za določanje mase poštnih pošilk v Mednarodni poštni zvezi.

V 1860. so preiskave razkrile obrabo prototipa metra, znane pa so bile tudi težave zaradi upogibanja palice med uporabo. Zaradi teh dvomov o zanesljivosti enot meter in kilogram in strahu pred konkurenčnim standardom, je Napoleon III. povabil znanstvenike vsega sveta, da se udeležijo srečanja v Parizu, vendar je prej izbruhnila vojna med Francijo in Prusijo. Čeprav so se delegati zbrali, so se dogovorili, da počakajo z odločitvami do takrat, ko se jim bodo lahko pridružili tudi nemški kolegi. Po vojni sta metrski sistem sprejeli tudi Nemčija in Italija in leta 1875 so se v Parizu na Metrski konvenciji zbrali predstavniki 17 evropskih in ameriških držav. Njihova glavna naloga je bila, da nadomestijo prototipe metra in kilograma, ki so bili do tedaj pod nadzorom francoskih oblasti, in vzpostavijo organizacijo, ki bo skrbela za vzdrževanje standardov po vsem svetu. Na podlagi sklepov te konvencije so izdelali prameter in prakilogram ter razdelili njune kopije po nacionalnih laboratorijih sveta. Z Metrsko konvencijo so ustanovili Mednarodni urad za uteži in mere (*Bureau international des poids et mesures*, BIPM). Glavni organ Metrske konvencije je Generalna konferenca za uteži

in mere (Conférence générale des poids et mesures, CGPM), v kateri so zastopane vse države članice in skrbi za interese članic na področju meroslovja. BIPM vzdržuje mednarodni sistem enot, izvaja raziskave na področju meroslovja in skrbi za skladnost merskih enot na mednarodni ravni. Delo BIPM nadzira in usmerja Mednarodni komite za uteži in mere (Comité International des Poids et Mesures, CIPM), ki dobiva smernice od CGPM.

Prvotni namen Metrske konvencije je bil določiti enoti za dolžino in maso. Za druge enote so skrbela druga združenja; za čas astronomsko združenje, za električne enote namenske konference, za druge fizikalne standarde in definicije pa mednarodna združenja, kot sta Mednarodni kongres za uporabno kemijo CSI ali Mednarodna zveza za osnovno in uporabno fiziko IUPAP. Leta 1901 je Giovanni Giorgi predlagal koherentni sistem štirih osnovnih enot meter, kilogram, sekunda in eno od električnih enot (amper, volt ali ohm). Leta 1954 so se na 10. CGPM odločili za enoto amper. Po dogovoru s CSI in IUPAP so pozneje dodali še enoti stopinja kelvina in kandela in tako je 1960 na 11. CGPM nastal mednarodni sistem enot SI, *Système International d'Unités*. Od takrat so osnovnemu naboru enot dodali leta 1971 na 14. CGPM še enoto mol, drugače pa se SI ni spreminjal več, popravljali so le definicije in izboljševali nasvete za čim bolj natančno realizacijo enot – *mise en pratique* [5].

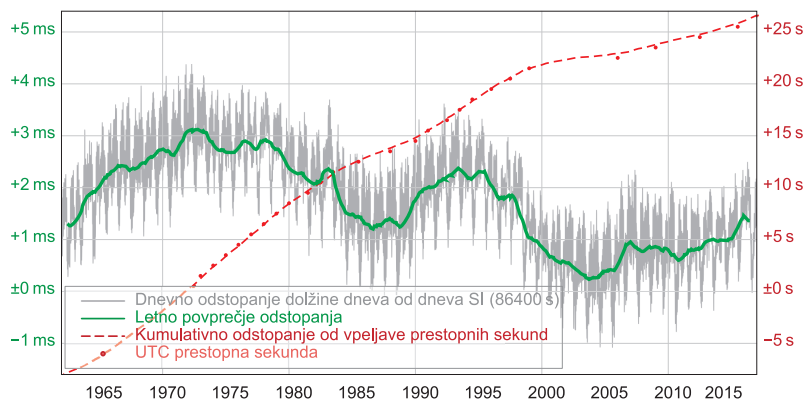
Težave starih definicij

S povečevanjem potreb po natančnosti merjenja se je izkazalo, da prvotno sprejete definicije enot niso primerne in iskati so začeli ustreznejše definicije.

Čas

Najprej si oglejmo enoto časa, saj na njej temeljijo definicije nekaterih drugih enot. Enota časa sekunda je bila prvotno definirana kot $1/86\,400$. del povprečnega sončnega dne. Natančna opredelitev povprečnega sončnega dne je bila prepuščena astronomom. Vendar pa so meritve pokazale, da zaradi nepravilnosti pri vrtenju Zemlje definicija ni zadovoljiva. Dolžina dneva stalno narašča zaradi učinka plime in niha zaradi sklopitve Zemlje z atmosfero ter vplivov prestavljanja mase v Zemljinem jedru, skorji, oceanih in ledenikih. Podatke o spreminjanju dolžine dneva prikazuje slika 1.

Da bi natančneje določili časovno enoto, je 11. CGPM leta 1960 sprejela definicijo, ki jo je določila Mednarodna astronomska zveza na podlagi tropskega leta 1900. Poskusi so kazali, da je atomski standard časa, ki temelji na prehodu med energijskima nivojema atoma ali molekule, možno realizirati in ponoviti precej bolj natančno. Natančna opredelitev časovne enote je



Slika 1. Spreminjanje dolžine dneva s časom za zadnjih 50 let [6].

nujna za znanost in tehnologijo in zato je 13. CGPM leta 1968 sprejela definicijo sekunde na osnovi cezijeve atomske ure. CIPM je na svojem srečanju leta 1997 definicijo popravil, da se nanaša na atome cezija 133 v mirovanju pri temperaturi 0 K.

Dolžina

Zanimivo je naraščanje natančnosti merjenja opazovati po zaporednih redefinicijah enote meter. Že pred prvo definicijo so tehtali različne predloge in ugotavljali njihove pomanjkljivosti. Npr. predlog z dvesekundnim nitnim nihalom, ki ima nit dolgo skoraj natančno en meter, ni bil sprejet, saj so meritve pokazale, da se težni pospešek spreminja s krajem. So pa te meritve bile osnova za razvoj natančne metode merjenja gravitacijskega pospeška. Tudi definicija z dolžino poldnevnikar se je izkazala za nenatančno, saj je dolžina poldnevnikar odvisna od geografske dolžine, zato so na Metrski konvenciji pristali na definicijo s prametrom. Meritve dolžine poldnevnikov so vodile do natančnega poznavanja oblike Zemlje. Zanimivo je, da so se že pri osnovni meritvi dolžine poldnevnikar zmotili in je prameter pravzaprav za 0,2 mm krajši, kot bi moral biti po predlogu definicije. Prameter so izdelali iz posebej trdne in obstojne zlitine 90 % platine in 10 % iridija s posebnim presekom tresca v obliki črke X, ki omogoča torzijsko stabilnost (slika 2). Prva definicija je določala dolžino metra kot razdaljo med zareza na prametru pri temperaturi tališča ledu. Do leta 1927 so definicijo popravili v: meter je razdalja pri 0 °C med osema zarez prametra pri normalnem zračnem tlaku, podprtem z dvema valjema s premerom večjim od enega centimetra, ki sta postavljena simetrično na medsebojni razdalji 571 mm. Ti Airyevi podporni točki sta izbrani zato, ker je upogib palice zaradi teže

tako najmanjši. Vse bolj natančne interferometrične meritve dolžin so vodile do nove definicije leta 1960. Po njej je bil meter enak dolžini 1 650 763,73 valovnih dolžin svetlobe v vakuumu, ki jo izseva kripton 86 pri prehodu med stanjema $2p_{10}$ in $5d_3$. Leta 1975 je bila sprejeta današnja definicija s hitrostjo svetlobe. S tem je bila hitrost svetlobe sprejeta kot naravna konstanta s točno določeno vrednostjo. Enota za razdaljo se torej oslanja zgolj na naravne konstante – hitrost svetlobe in frekvenco izsevane svetlobe pri točno določenem atomskem prehodu.

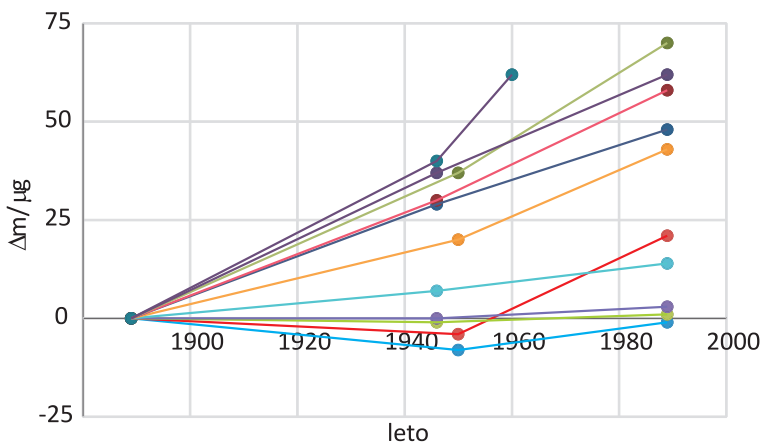


Slika 2. Prameter je izdelan iz posebej trdne in obstojne zlitine 90 % platine in 10 % iridija s posebnim presekom tresca v obliki črke X, ki omogoča torzijsko stabilnost.

Masa

Od 1960, ko se je definicija metra navezala na valovno dolžino svetlobe in ne več na prameter, je kilogram ostal edina enota vezana na predmet. Prvotna ideja za kilogram izvira iz leta 1793 kot teža enega kubičnega decimetra čiste vode pri ledišču. Takrat so enoto imenovali grave. Leta 1889 so definicijo naslonili na maso vode pri $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ in na podlagi podpisane Metrske konvencije definirali enoto kilogram in izdelali artefakt, ki jo je predstavljal. To je bil majhen valj ≈ 47 kubičnih centimetrov zlitine platine in iridija – prakilograma, ki ga hranijo v Pavillon de Breteuil. Mednarodni prototip kilograma hranijo pod pogoji, ki jih je določila 1. CGPM leta 1889. Tretja CGPM (1901) je v deklaraciji, s katero se je končala dvoumnost pri popularni uporabi besede teža, potrdila, da je kilogram enota mase, ki je enaka masi mednarodnega prototipa kilograma. Prakilogram so v poznejših letih nekajkrat primerjali s kopijami, ki so bile sočasno z originalno definicijo razdeljene po nacionalnih laboratorijih članic CGPM. Ugotovili so, da z leti prihaja do vedno večjih razlik med maso prakilograma in njegovih kopij v velikostnem redu $20 \cdot 10^{-9}$ kilogramov letno. Podatki primerjav mase pra-

kilograma in mase njegovih kopij so na sliki 3. Nerodno je, ker zaradi same definicije kilograma ne vemo, ali do odstopanja prihaja zato, ker kopije pridobivajo maso (npr. z absorpcijo živega srebra), ali zato, ker jo prakilogram izgublja (npr. zaradi čiščenja). Zato so na 21. srečanju CGPM leta 1999 pozvali k razmisleku o novi definiciji.



Slika 3. Prakilogram so nekajkrat primerjali s kopijami, ki so bile sočasno z originalno definicijo razdeljene po nacionalnih laboratorijih članic CGPM. Zaporedne meritve kažejo vedno večja odstopanja, v povprečju navzgor. Nerodno je, ker zaradi same definicije kilograma ne vemo, ali do odstopanja prihaja zato, ker kopije pridobivajo maso (npr. z absorpcijo živega srebra), ali zato, ker jo prakilogram izgublja (npr. zaradi čiščenja). [1]

Iz definicije enote kilogram sledi, da je masa mednarodnega prototipa kilograma vedno točno 1 kilogram, vendar pa masa prakilograma v resnici naraste za približno $1 \mu g$ na leto zaradi neizogibnega kopičenja polutantov, ki se absorbirajo na površini. Zato je CIPM določil, da je referenčna masa mednarodnega prototipa enaka tisti, takoj po čiščenju in pranju prototipa z vnaprej določeno metodo. Zaradi težav z možnostjo nezaznanega spreminjanja masne enote so začeli iskati realizacijo, poskus, s katerim se lahko neka osnovna konstanta, npr. Planckova ali Avogadrova, preko mase določi z dovolj majhno negotovostjo, kar bi potem služilo za redefinicijo enote. Tako se je začel razvoj metode tehtanja s Kibblovo (Wattovo) tehniko in projekt Avogadro.

Tok

Prvotno je bil amper definiran elektrokemično kot tok, pri katerem se iz raztopine srebrovega nitrata vsako sekundo na elektrodi nabere 1,118 miligrama srebra. Od ampera v sistemu SI se ta enota razlikuje za 0,015 %. Od

leta 1881 je bil amper definiran kot desetina elektromagnetne enote toka v sistemu CGS. Ta je bila definirana kot tok, ki teče po obsegu krožnice s polmerom en centimeter in v njenem središču ustvari magnetno polje 2π oerstedov. V predhodnem sistemu CGS sta bili dve definiciji toka, ena praktično enaka definiciji v SI, druga pa je temeljila na električnem naboju, kot osnovni enoti, kjer je bila enota naboja definirana preko sile med naelektrenima kovinskima ploščama. Električne enote za tok in upor je uvedel Mednarodni električni kongres, ki je potekal v Chicagu leta 1893. Na 9. CGPM leta 1948 so sprejeli amper za enoto električnega toka: amper je jakost konstantnega toka v dveh ravnih vzporednih vodnikih, neskončne dolžine in zanemarljivega krožnega prečnega preseka, ki sta v vakuumu 1 meter narazen, in povzroča med vodnikoma silo $2 \cdot 10^{-7}$ newtonov na meter dolžine. Iz definicije sledi, da je magnetna konstanta μ_0 , znana tudi kot permeabilnost praznega prostora, točno $4\pi \cdot 10^{-7}$ henrijev na meter. Na prvi pogled je enota že primerno naslonjena na naravno konstanto. Težava se pokaže pri realizaciji enote. Težko je natančno meriti silo na enoto dolžine neskončno dolgih vodnikov. Amper najbolj natančno realiziramo z Wattovo tehtnico, v praksi pa ga vzdržujemo preko Ohmovega zakona preko enot za napetost in upor, volt in ohm. Ti enoti enostavno realiziramo z Josephsonovim stikom in s kvantnim Hallovim pojavom.

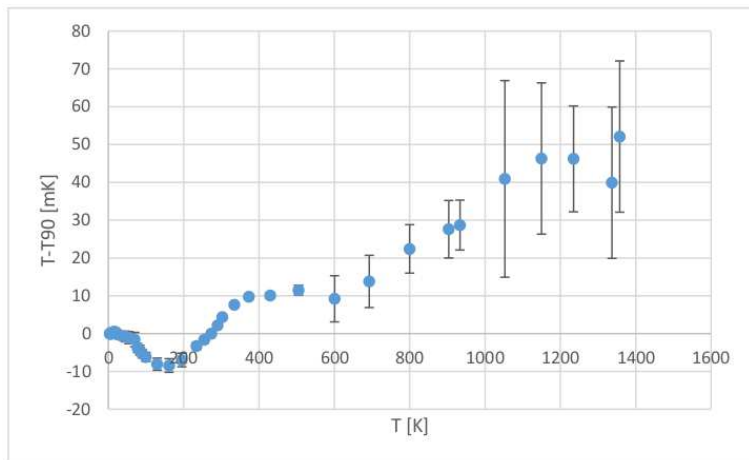
Temperatura

Definicija enote termodinamične temperature je bila sprejeta na 10. CGPM leta 1954, tako da trojni točki vode pripiše temperaturo 273,16 K. Na 13. CGPM leta 1968 so namesto stopinje Kelvina s simbolom $^{\circ}\text{K}$ uvedli ime kelvin s simbolom K. CIPM je na sestanku leta 2005 potrdila, da se definicija nanaša na vodo, ki ustreza dunajskemu standardu povprečne oceanske vode in ima izotopsko sestavo z razmerji: 0,00015576 mola ^2H na mol ^1H , 0,0003799 molov ^{17}O na mol ^{16}O in 0,0020052 mola ^{18}O na mol ^{16}O . Če se pri merjenju uporabi referenčno celico, ki vsebuje vodo z napačno izotopsko sestavo, to lahko vodi do napak velikostnega reda sto mikrokkelvinov. Enota za temperaturo je bila definirana glede na Celzijevo temperaturno lestvico t , kjer temperaturo izrazimo s termodinamično temperaturo T s formulo $t = T - T_0$, kjer je $T_0 = 273,15$ K ledišče vode. Enota celzijeve temperature je stopinja Celzija, ki je po definiciji enakovredna kelvinu. Razlika ali interval temperature se lahko izrazi v kelvinih ali v stopinjah Celzija, pri čemer je numerična vrednost temperaturne razlike enaka. Kelvin in stopinja Celzija sta tudi enoti mednarodne temperaturne lestvice iz leta 1990 (ITS-90). Od leta 1743 je bila temperatura definirana s stopinjsko lestvico, ki ima 0°C pri ledišču vode in 100°C pri vrelišču vode. Nato so definicijo leta 1954 spreme-

nili tako, da ima trojna točka vode ($0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$) temperaturo točno $273,16\text{ K}$, od 1967 dalje pa je en kelvin enak $1/273,16$ termodinamične temperature trojne točke vode. Posledica definiranja trojne točke standardne vode kot $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$ in $273,16\text{ K}$ je, da niti tališče niti vrelišče vode pri normalnem tlaku ($101,325\text{ kPa}$) nista več temperaturi, s katerima bi lahko definirali Celzijevo lestvico. Meritve kažejo, da se trojna točka in tališče vode razlikujeta le za $0,009911(10)\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tališče ledu je torej $+0,000089(10)^{\circ}\text{C}$. Velikost stopinje je določena z absolutno ničlo in ne s stotino temperaturnega intervala od vrelišča do tališča. Vrelišče vode je zato pri $373,1339\text{ K}$ ($99,9839\text{ }^{\circ}\text{C}$). S kalibracijo na ITS-90 je vrelišče vode pri $99,974\text{ }^{\circ}\text{C}$. Razlika $16,1$ milikelvina med vreliščem prvotne Celzijeve lestvice in trenutne praktično ne vpliva veliko, saj je vrelišče vode zelo občutljivo na spremembo tlaka. Npr. sprememba nadmorske višine za 28 cm spremeni temperaturo vrelišča za 1 milikelvin. Leta 2007 je posvetovalna komisija za termometrijo sporočila CIPM, da obstoječa definicija temperature ni zadovoljiva za merjenje temperature v intervalih pod 20 K in nad 1300 K . Naraščanje merilne negotovosti jasno kažejo negotovosti referenčnih točk v ITS-90, kot razberemo s slike 4. Menili so, da je definicija z Boltzmannovo konstanto boljša.

Množina

Po odkritju osnovnih kemijskih zakonov so bile za določanje količin kemičnih elementov ali spojin uporabljene enote gram-atom in gram-molekula. Te enote so pravzaprav relativne mase. Atomske uteži so se prvotno nanašale na atomsko težo kisika, ki je bila splošno dogovorjena kot 16. Kisik so uporabili zato, ker je med bolj reaktivnimi elementi in omogoča enostavno primerjavo z drugimi elementi. Z masno spektrometrijo so pozneje odkrili izotope in vrednost 16 ustreza le enemu od izotopov kisika in ne naravni mešanici izotopov. Sporazum med Mednarodno zvezo čiste in uporabne fizike (IUPAP) in Mednarodno zvezo za čisto in uporabno kemijo (IUPAC) je leta 1959/60 končal to dvumnost in pripisal vrednost 12 atomski teži izotopa ogljika 12. Namesto atomska teža zdaj uporabljamo izraz relativna atomska masa. Količine kemičnih elementov ali spojin podamo z množino, ki je sorazmerna s številom določenih osnovnih enot, entitet v vzorcu. Konstanta sorazmernosti je naravna konstanta. Enota množine je mol s simbolom mol. Mol je definiran z določitvijo mase ogljika 12, ki predstavlja en mol atomov ogljika 12. Z mednarodnim dogovorom je bila ta masa določena kot $0,012\text{ kg}$, to je 12 g . Po predlogih IUPAP, IUPAC in ISO je CIPM leta 1967 opredelil mol in ga potrdil leta 1969. 14. CGPM je leta 1971 sprejel definicijo: mol je količina snovi v sistemu, ki vsebuje toliko elementov (entitet), kot je atomov v $0,012$ kilograma ogljika 12. Ko uporabimo mol, moramo določiti



Slika 4. Odstopanja in negotovosti referenčnih temperatur mednarodne temperaturne lestvice ITS-90. Negotovost pri temperaturah večjih od 1000 K močno naraste. Lestvica ITS-90 temelji na množici umeritvenih točk, in sicer trojni točki vodika (13,8033 K), neona (24,5561 K), kisika (54,3584 K), argona (83,8058 K), živega srebra (234,3156 K), vode (273,16 K), tališču galija (302,9146 K), indija (429,7485 K), kositra (505,078 K), cinka (692,677 K), aluminija (933,473 K), srebra (1 234,93 K), zlata (1 337,33 K) in bakra (1 357,77 K). Termometri, ki se uporabljajo za določanje temperature v različnih intervalih, so: od 0,65–3,2 K plinski termometer s helijem 3, od 1,25–2,1768 plinski termometer s helijem 4, od 2,1768–5,0 plinski termometer s helijem 4 in drugačno zvezo med tlakom in temperaturo, 3,0–24,5561 helijev plinski termometer kalibriran v treh specifičnih točkah, 13,8033–1234,93 platinski uporovni termometer, z uporom kalibriranim v več fiksnih točkah in z določeno interpolacijsko funkcijo, nad 1234,93 optični pirometer.

osnovne elemente, ki so lahko atomi, molekule, ioni, elektroni, drugi delci ali določene skupine takšnih delcev. Iz tega izhaja, da je molska masa ogljika 12 točno 12 gramov na mol. Leta 1980 je CIPM izostril definicijo, da so navedeni atomi ogljika 12 nevezani, v mirovanju in v svojem osnovnem stanju. Opredelitev mola določa tudi vrednost univerzalne konstante, Avogadrove konstante, ki povezuje število entitet z vsebnostjo snovi za kateri koli vzorec.

Svetilnost

Kandela temelji na količini svetlobe, ki jo oddaja goreča standardna sveča. Enote svetilnosti (jakost sevanja) na osnovi plamenskih ali žarilnih standardov žarilne nitke, ki so jih uporabljali v različnih državah pred letom 1948, je najprej nadomestila nova sveča. Nova sveča je tolikšna, da je svetilnost površine kvadratnega centimetra črnega telesa (Planckovega sevalnika) pri

tališču platine enaka 60 sveč. To definicijo sta pripravila Mednarodna komisija za osvetlitev (CIE) in CIPM. Definicijo je leta 1948 potrdila 9. CGPM in sprejela novo mednarodno ime enote kandela. Leta 1979 je bila zaradi težav pri realizaciji Planckovega sevalnika pri visokih temperaturah in razvoja radiometrije sprejeta nova definicija, da je kandela svetilnost vira v izbrani smeri, ki oddaja svetlobo s frekvenco $5,4 \cdot 10^{12}$ Hz z močjo 1/683 wattov v prostorski kot en steradian.

Redefinicije enot

Že prvotne definicije enot metrske konvencije so sledile načelu, da se naslanjajo na naravni pojav in se jih lahko realizira neodvisno od etalonov, vendar visoke zahteve po natančnosti in razvoj meroslovja pokažejo pomanjkljivosti teh definicij. Dve, za čas in dolžino, sta že bili naslonjeni na naravni konstanti, ostajala pa je težava s prakilogramom. Tudi to definicijo so sklenili nasloniti na naravno konstanto. CGPM je 16. novembra 2018 sprejela nove definicije osnovnih enot sistema SI, ki jih je predlagal BIPM. Nove definicije bodo stopile v veljavo 20. maja 2019.

Po stari definiciji [3] je sekunda trajanje 9 192 631 770 period sevanja, ki ustreza prehodu med dvema hiperfinima nivojema osnovnega stanja atoma cezija 133. Po novem pa je definicija:

sekunda je taka, da je frekvenca valovanja $\Delta\nu_{Cs}$, ki ga odda atom cezija 133 na absolutni ničli pri prehodu med nivojema hiperfinega razcepa osnovnega stanja, fiksna in enaka $9\,192\,631\,770\text{ s}^{-1}$.

Stara definicija enote za dolžino: meter je dolžina poti, ki jo prepotuje svetloba v vakuumu v časovnem intervalu 1/299 792 458 sekunde. Iz tega sledi, da je hitrost svetlobe v vakuumu točno 299 792 458 metrov na sekundo, $c = 299\,792\,458\text{ m/s}$. Nova definicija:

enota meter je taka, da ima hitrost svetlobe v vakuumu fiksno vrednost $299\,792\,458\text{ m s}^{-1}$, kjer je sekunda definirana s cezijevo frekvenco $\Delta\nu_{Cs}$.

Stara definicija kilograma: kilogram je enota mase, ki je enaka masi mednarodnega etalona prototipa kilograma. Nova definicija kilograma:

enota za maso je kilogram, določen prek Planckove konstante, ki ima fiksno vrednost $6,62607015 \cdot 10^{-34} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-1}$, kjer sta meter in sekunda definirana skladno s SI.

Stara definicija ampera: amper je konstantni električni tok, ki bi pri prehodu skozi dva premočrtna, vzporedna, neskončno dolga vodnika zane-marljivega krožnega prereza, postavljena v vakuumu v medsebojni razdalji 1 m, povzročil med njima silo $2 \cdot 10^{-7}$ newtonov na meter dolžine. Nova definicija:

amper je enota za električni tok, ki je definirana preko električnega naboja in sekunde. Osnovni električni naboj ima definirano fiksno vre-dnost $1,602176634 \cdot 10^{-19} \text{ A s}^{-1}$, kjer je sekunda definirana skladno s SI.

Stara definicija kelvina: kelvin, enota termodinamične temperature, je $1/273,16$ -ti del termodinamične temperature trojne točke vode. Po novi definiciji

je kelvin definiran tako, da ima Boltzmannova konstanta fiksno vre-dnost $1,380649 \cdot 10^{-23} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2} \text{ K}^{-1}$, kjer so meter, sekunda in kilo-gram definirani skladno s SI.

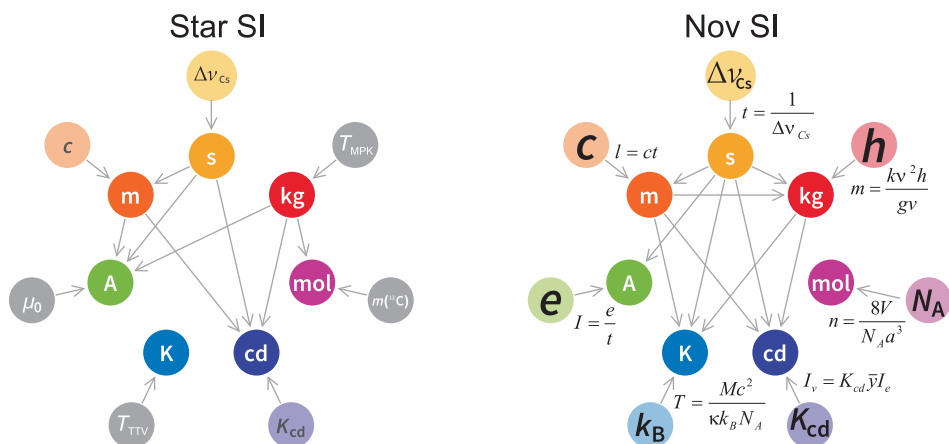
Stara definicija mola: mol je množina snovi v sistemu, ki vsebuje toliko osnovnih edink (entitet), kolikor je atomov v 0,012 kilograma ogljika 12. Pri uporabi mola je treba navesti osnovne edinke, ki so lahko atomi, molekule, ioni, elektroni, drugi delci ali določene skupine takšnih delcev. Po novi definiciji je mol definiran tako:

mol je definiran tako, da ima Avogadrova konstanta fiksno vrednost $6,02214076 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$.

Po stari definiciji je kandela (candela) svetilnost vira, ki v dani smeri od-daja monokromatsko sevanje frekvence $540 \cdot 10^{12}$ hertzov in seva z jakostjo $1/683$ watta na steradian. Po novi definiciji:

kandela je definirana tako, da je spektralna svetlobna učinkovitost za monokromatsko sevanje s frekvenco $540 \cdot 10^{12}$ Hz enaka $683 \text{ cd sr kg}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ s}^3$, kjer so kilogram, meter in sekunda definirani skladno s SI.

Vidimo, da so definicije vseh enot vezane na naravne konstante, nekatere enote pa so vezane na definicije drugih enot. Medsebojne odvisnosti prikazuje diagram na sliki 5.



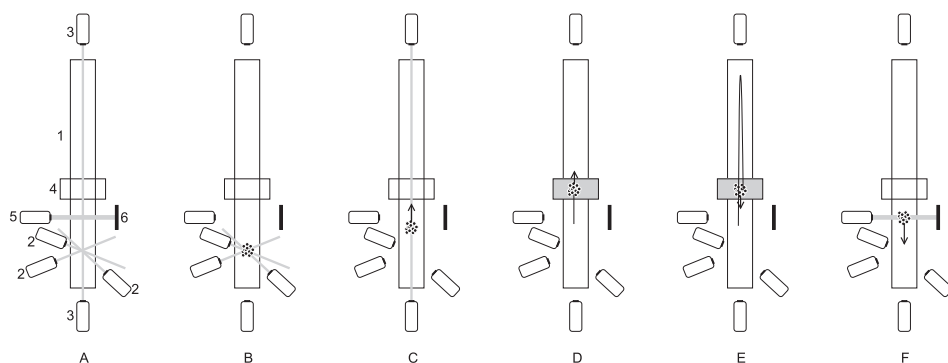
Slika 5. Odvisnosti definicij osnovnih enot od naravnih konstant in od drugih enot za star SI (levo) in nov SI (desno). V starem sistemu je npr. kelvin temeljil le na trojni točki vode, v novem pa temelji na Boltzmannovi konstanti in definicijah metra, sekunde in kilograma. V predstavitvi novega sistema so nakazane naravne konstante, na katerih slonijo definicije osnovnih enot. V nekaterih definicijah osnovnih enot je uporabljena definicija kake druge enote, kar tudi ponazarjajo enačbe in ustrezne puščice.

Realizacije enot

Realizacija enote pomeni izvedbo postopka, s katerim definicijo enote prevedemo v merljivo količino. Realizacije osnovnih enot s čim manjšo negotovostjo predlaga BIPM [5].

Z definicijo sekunde je definirana enota lastnega časa v območju, ki miruje glede na atomsko uro, in realizacija je veljavna v dovolj majhnem območju, da lahko zanemarimo razlike v gravitacijskem potencialu. Pri realizaciji moramo upoštevati relativistične popravke zaradi gibanja cezijeveh atomov, ne pa zaradi gravitacije. Definicija je veljavna za nevzbujene atome pri absolutni ničli. V atomski uri čas pravzaprav meri elektronski oscilator,

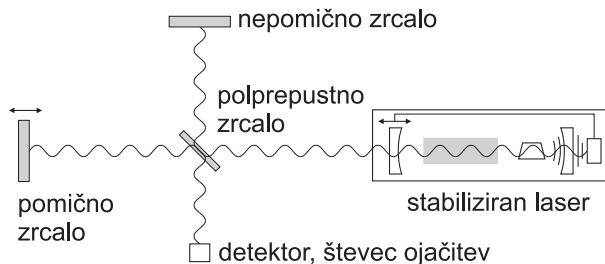
katerega lastno frekvenco lahko spreminjamo s povratno zanko tako, da ga resonančno uglasimo na frekvenco prehoda med hiperfinim razcepom energijskih stanj cezijevega atoma. Oscilator napaja mikrovalovni resonator, skozi katerega laser potisne navpično navzgor gručo ohlajenih cezijevega atoma. Gruča atomov zaradi teže nato pade spet nazaj skozi ta resonator. Število atomov, ki se pri tem vzbudi, je odvisno od tega, kako se frekvenca mikrovalov ujema s frekvenco prehoda. Če je ujemanje popolno, je to število največje. Število ugotavljajo tako, da gručo obseva z laserjem, ki povzroči stimulirano emisijo vzbujenih atomov. Moč stimulirane emisije daje signal, s katerim se kontrolira vzbujevalna frekvenca. Na ta način delujejo najnatančnejše atomske ure, katerih negotovost je velikostnega reda 10^{-16} . Taka ura zgreši sekundo na kakih 300 milijonov let. Primer fontanske atomske ure kaže slika 6.



Slika 6. A – Sestava fontanske cezijeve atomske ure: 1 – ohlajena vakuumsko posoda, 2 – laserji za hlajenje atomov, 3 – navpični laserji za navpični met gruč atomov, 4 – mikrovalovni resonator, 5 – detekcijski laser, 6 – detektor. Delovanje ure opišemo v korakih: B – cezijeve atome ohladimo v gručo, C – gručo laser potisne navpično navzgor, D – gruča preide skozi resonator in se po približno eni sekundi vrne skozenj, E – v resonatorju se atomi vzbudijo, F – količino vzbujenih atomov zaznamo z detektorskim laserjem.

Za praktično merjenje dolžin lahko uporabimo tri načine; tako da merimo čas potovanja svetlobe ali pa interferenčno, s štetjem valovnih dolžin laserjev z natančno znanimi frekvencami svetlobe in zvezo $c = \lambda\nu$. Za majhne premike je primernejše interferenčno merjenje (slika 7), za daljše razdalje pa način z merjenjem časa preleta.

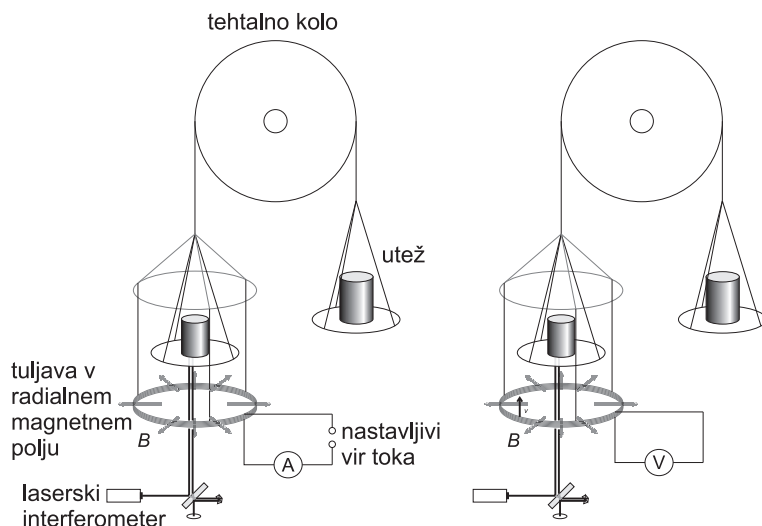
Maso nekega telesa določimo z negotovostjo 10^{-8} tako, da ga stehtamo s Kibblovo tehtnico, katere sestavo in delovanje prikazuje slika 8. To je primerjalna tehtnica s posodico, v katero postavimo utež, katere težo mg uravnovesi na drugi strani magnetna sila na tuljavo, ki se nahaja v radialnem magnetnem polju B , skozi katero nastavimo pravi tok I : $mg = IlB$.



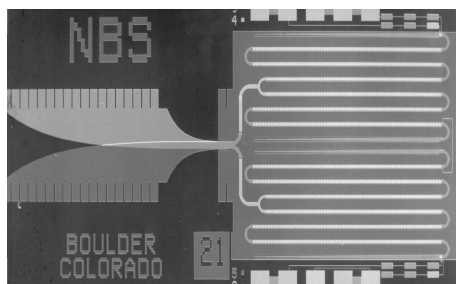
Slika 7. Interferenčno merjenje majhnih premikov, ki jih prenesemo na zrcalo enega kraka interferometra.

Dolžina vodnika v tuljavi je l . V ločenem poskusu pomikamo tuljavo skozi magnetno polje in natančno merimo njeno hitrost v z interferometrom. Na njenih priključkih se tedaj inducira napetost $U = lvB$. Če združimo obe meritvi, je masa določena z izrazom: $m = \frac{UI}{gv}$. Napetost na tuljavi lahko zelo natančno merimo z Josephsonovim stikom (slika 9), kjer izkoriščamo makroskopski kvantni Josephsonov pojav. Josephsonov stik sestavljata dva superprevodnika, ločena s tanko plastjo izolatorja. Če stik napajamo z izmeničnim tokom s frekvenco ν_n , potem se na stiku pojavi stalna napetost $U = \frac{n_n h \nu_n}{2e} = \frac{n_n \nu_n}{K_J}$, kjer je n_n kvantizacijsko (celo) število, e je osnovni naboj, h Planckova konstanta, K_J pa Josephsonova konstanta. Na mreži zaporedno vezanih N_n stikov je napetost tolikokrat večja. Tudi tok skozi tuljavo merimo posredno z Josephsonovim pojavom, tako da merimo napetost na upor R , ki ga natančno realiziramo s kvantnim Hallovim pojavom $R = \frac{h}{n_r e^2} = \frac{R_K}{n_r}$, n_r je kvantizacijsko (celo) število, R_K pa von Klitzingova konstanta. Tok, po Ohmovem zakonu, sledi $I = \frac{U_t}{R} = \frac{N_t n_t \nu_t n_r e}{2}$. Merjeno maso torej lahko izrazimo kot $m = \frac{N_t N_n n_n n_t n_r \nu_n \nu_t h}{4gv} = k \frac{\nu_n \nu_t}{4gv} h$. V izrazu nastopajo celoštevilska konstanta k , frekvence, ki jih merimo natančno preko standarda za čas, hitrost, ki jo merimo natančno preko standarda za dolžino in čas, gravitacijski pospešek g , ki ga tudi merimo preko standarda za dožino in čas, ter Planckova konstanta h . Gravitacijski pospešek na mestu uteži določijo zelo natančno z merjenjem padanja uteži. Meritev je tako natančna, da zazna razliko v težnem pospešku na razliki višin nekaj decimetrov. Iz izraza vidimo, da je definicija kilograma vezana na vrednost Planckove konstante in definiciji enot za čas in dolžino.

Enoto mol realizirajo z monokristalno, natančno polirano silicijevo kroglo (slika 10). Prostornino krogle V določijo z optično interferometrijo. Površina je narejena zelo natančno in odstopanja od krogelne oblike so tako majhna, da bi imela taka krogla, če bi jo napihnili na velikost Zemlje, gore in doline velike le deset centimetrov. Velikost osnovne kristalne celice a_0



Slika 8. Kibblova tehtnica, s katero določamo maso uteži tako, da merimo tok na tuljavi v magnetnem polju, ki z magnetno silo uravnovesi težo uteži (levo). Magnetno polje določimo s premikanjem tuljave v njem in merjenjem inducirane napetosti (desno).



Slika 9. Mikroskopska slika čipa z mrežo Josephsonovih stikov, ki ga v National Institute of Standards and Technology uporabljajo za standardni volt in merjenje napetosti. Vir: NIST

določijo z rentgenskim optičnim interferometrom. Maso krogle m natančno tehtajo s primerjalno tehtnico. Da kroglja ne vsebuje nečistoč, preverijo z rentgensko preiskavo površine. Molsko maso M določijo z masno spektroskopijo. Te količine so med seboj povezane z zvezo $N_A = \frac{8V}{a_0^3} \cdot \frac{M}{m}$.

Zaradi zveze med merljivimi količinami, maso in naravno konstanto je bila metoda tudi kandidatka za realizacijo mase. Na koncu so se odločili za metodo s Kibblovo tehtnico, ker doseže manjšo negotovost.

Enota za temperaturo se lahko realizira na več načinov, kar bo tudi izboljšalo negotovost merjenja temperature v širšem intervalu. Eden od na-



Slika 10. Silicijeva krogla, s katero določijo enoto za množino snovi mol. Vir: NIST

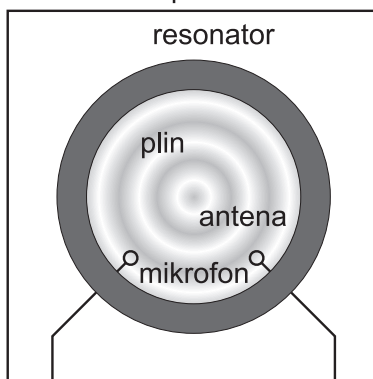
činov je preko merjenja hitrosti zvoka v razredčenem plinu v sistemu, kot ga kaže slika 11. Merijo tako, da vzpostavijo stoječe valovanje v okrogli posodi, katere polmer je natančno izmerjen. Na ta način lahko natančno določijo valovno dolžino zvoka. Frekvenco zvoka izmerijo posebej in iz zveze $c = \lambda\nu$ določijo hitrost zvoka. Hitrost zvoka je v plinu odvisna od temperature, odvisnost opiše zveza $c^2 = \frac{\kappa k_B T}{m}$, kjer je κ razmerje specifične toplote pri stalnem tlaku in specifične toplote pri konstantni prostornini in je za monoatomne pline, kot sta helij ali argon, enako $5/3$. m je masa atomov ali molekul plina in k_B Boltzmannova konstanta. Temperaturo torej lahko izmerimo z določitvijo vrednosti Boltzmannove konstante, tehtanjem mase ter merjenjem dolžine in časa.

Drugi načini realizacije enote temperature so npr. še določanje dielektrične konstante plina z merjenjem kapacitete kondenzatorja napolnjenega s plinom, merjenje Johnsonovega termičnega šuma v uporniku ali z merjenjem Dopplerjeve razširitve absorpcijskega spektra v plinu.

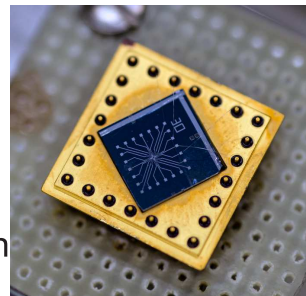
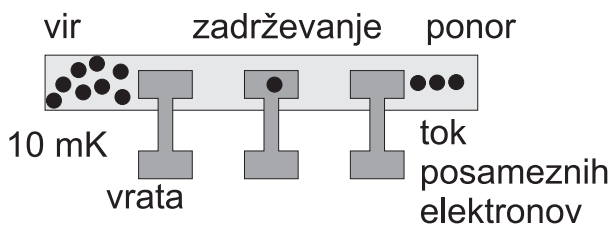
Realizacija ampera je možna preko Ohmovega zakona ($I = U/R$), polnjenja kondenzatorja ($I = C \frac{dU}{dt}$), štetja elektronov (SET – Single Electron Transport). Enoti za upor in napetost lahko realiziramo z Josephsonovim stikom in s kvantnim Hallovim pojavom. Slika 12 prikazuje shematično delovanje (levo) in posnetek čipa (desno) za SET.

Definicija kandelega pravzaprav povezuje fotometrične X_f in radiometrične $X_r(\lambda)$ enote: $X_f = K_{cd} \int_{360 \text{ nm}}^{830 \text{ nm}} \frac{dX_r(\lambda)}{d\lambda} V(\lambda) d\lambda$. K_{cd} je naravna konstanta

vakuumska posoda



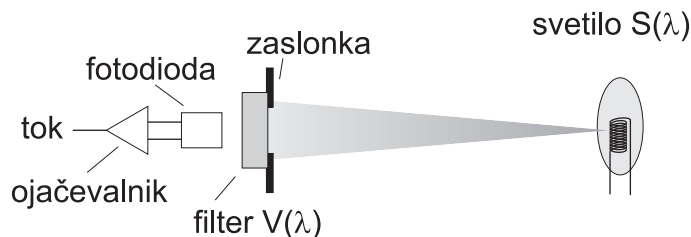
Slika 11. Posoda, s katero merijo hitrost zvoka v razredčenem plinu in posredno temperaturo plina.



Slika 12. Delovanje sistema za štetje elektronov (levo) in fotografija čipa (desno), ki ga lahko uporabimo za realizacijo enote amper. Vir: NIST

683 lm/W, $V(\lambda)$ pa funkcija svetlobne občutljivosti (npr. občutljivost očesa pri fotopičnem vidu). Radiometrični enoti watt ustreza fotometrična lumen in wattu na steradian ustreza kandela. Za realizacijo kandelega potrebujemo radiometrično umerjene detektorje svetlobe, bodisi kriogenske radiometre bodisi polprevodniške elemente, ki svetlobni signal pretvarjajo v natančno merjeni električni signal. Radiometri imajo široko spektralno občutljivost in sami zase ne dajo podatka o fotometrični lastnosti svetila, zato potrebujejo še svetlobni filter za korekcijo na karakteristiko $V(\lambda)$, ki mora biti neodvisno kalibriran. V praksi se pogosto meri odziv radiometra kar z lasersko svetlobo. Radiometer meri svetlobno moč, za svetilnost moramo upoštevati še geometrijske lastnosti svetlobe, ki jo oddaja svetilo – oddaljenost svetila in velikost odprtine na zaslonki – to definira prostorski kot, iz katerega detektor zajema signal. Kandelu lahko realiziramo tudi s standardnimi absolutnimi

svetili s karakteristiko $S(\lambda)$, pri katerih natančno izmerimo pogoje, pod katerimi delujejo (temperatura ali napajalni tok). Absolutno svetilo je npr. Planckov sevalnik – segreta počrnjena votilna. Kandela se najpogosteje realizira s standardno žarnico, ki je postavljena dovolj daleč od dovolj majhne zaslonke, da žarilno nitko lahko obravnavamo kot točkasto svetilo. Napajanje žarnice običajno izberejo tako, da ustreza svetloba standardnemu svetilu tipa A, ki ima enak spekter kot črno telo segreto na 2856 K. Shema sistema za realizacijo kandelega prikazuje slika 13.



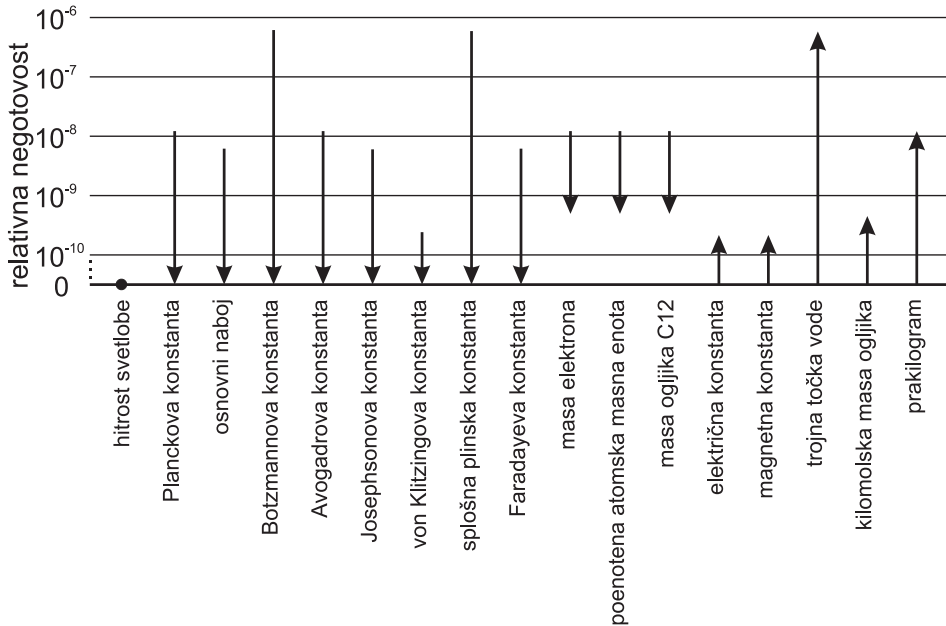
Slika 13. Shema sistema za realizacijo kandelega.

Zaključek

Vseh sedem osnovnih enot po redefiniciji temelji na splošnih naravnih in dogovorjenih konstantah. Razen sekunde in mola temeljijo definicije preostalih enot tudi na definicijah drugih enot, kot kaže slika 5. Pri izbiri definicijskih konstant bi lahko izbirali med več kot šestimi primernimi konstantami. Definicijo kilograma bi z definirano sekundo in metrom lahko naslonili npr. na gravitacijsko konstanto G . Vendar je negotovost, s katero merimo G , velikostnega reda 10^{-5} , kar je dosti večje od negotovosti $1,2 \cdot 10^{-8}$, ki jo dosežemo pri določanju mase s sprejeto definicijo s Planckovo konstanto. Nabor konstant, uporabljenih v redefinicijah, je bil izbran tako, da zagotavljajo čim manjšo negotovost pri realizaciji enot in čim večjo stopnjo neodvisnosti uporabljenih konstant od drugih konstant.

Nekatere osnovne naravne konstante so povezane med seboj, npr. električno konstanto ϵ_0 , magnetno konstanto μ_0 in svetlobno hitrost v vakuumu c povezuje izraz $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$. Vrednost povezane konstante določimo iz znane zveze z merjenjem drugih konstant. Negotovost take konstante je določena s kombinacijo negotovosti konstant, kot ustreza uporabljenemu izrazu. Negotovost konstant, katerih vrednost je določena z definicijo enote, je enaka nič. Zato se bo izboljšala negotovost tudi več drugih konstant. Pri redefiniciji so pazili, da je število konstant, katerih negotovost se poveča, čim manjše. Vrednost magnetne konstante je bila nekdaž z definicijo ampera določena

točno na $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Vs/Am in preko prej omenjene zveze je bila točna tudi vrednost električne konstante, saj je hitrost svetlobe določena z definicijo metra in brez negotovosti. Velikost osnovnega električnega naboja se je nekdanj določala z meritvami. Po redefiniciji ampera je velikost osnovnega naboja točna, magnetna in električna konstanta pa postaneta merjeni količini. Nekaj konstant in spremembe njihovih negotovosti prikazuje slika 14.



Slika 14. Spremembe relativnih negotovosti nekaterih naravnih konstant. Negotovost konstant, ki jim določimo vrednost z definicijo enot, in z njimi neposredno povezanih drugih konstant je enaka nič.

Ko je postal očiten problem razlik mas prakilograma in nacionalnih etalonov, se je razvila razprava o tem, kako bi kilogram redefinirali, ali preko števila atomov silicija 28 ali s Kibblovo tehtnico?

S projektom Avogadro bi Avogadrovo konstanto vezali neposredno na kilogram. Vendar se s tem pristopom poruši zveza med molom, kilogramom, poenoteno atomsko masno enoto in Avogadrovo konstanto. Poenotena atomska masna enota $u = \{m_u\}$ kg je definirana z maso atoma ogljika 12: $m_u = \frac{1}{12}m(^{12}\text{C}) = 1,660539040(20) \cdot 10^{-27}$ kg. Znana je tudi kot dalton (simbol Da) in ni enota SI. Avogadrova konstanta je bila definirana s to maso in maso kilograma, kar poimeni, da Avogadrova konstanta ni imela določene vrednosti, ampak se je njeno vrednost izmerilo. Predlog redefi-

nicije določi vrednost Avogadrove konstante. Če obdržimo staro definicijo daltona kot dvanajstino mase ogljika 12, dalton ne more biti več povezan s kilogramom in zveza $N_A = \frac{g}{u} \text{ mol}^{-1}$ ne velja več natančno. V 12 g ogljika je torej le približno Avogadrovo število atomov.

Relativna atomska masa entitete X je $A_r(X) = \frac{m(X)}{m_u}$. Molska masa entitete X je $M(X) = m(X)N_A = A_r(X)m_uN_A$. Molska masna konstanta je definirana $M_u = M(^{12}\text{C})/12$. Po stari definiciji kilograma in mola je bila vrednost M_u točno 1 g mol^{-1} . Zdaj je mol definiran s fiksno vrednostjo N_A . Eksperimentalno se vrednost molske masne konstante določa iz količine $M_u = \frac{R_\infty}{A_r(e)\alpha^2} \left(\frac{2N_A h}{c} \right)$. Količine v oklepaju so naravne konstante brez negotovosti, R_∞ je Rydbergova konstanta, α je konstanta fine strukture, $A_r(e)$ pa je relativna masa elektrona. Skladno z redefinicijo se vrednost M_u ne spremeni, njena negotovost pa je določena z $u(M_u) = u\left(\frac{R_\infty}{A_r(e)\alpha^2}\right)$. Ker je $M_u = m_uN_A$, je negotovost poenotene atomske masne enote enaka negotovosti molske masne konstante in se z redefinicijo zmanjša za faktor 20. V fiziki delcev se pogosto uporablja elektronvolt (simbol eV), ki ga s poenoteno atomsko masno enoto povezuje izraz za lastno energijo $E = mc^2$, tako da ustreza $1 \text{ u} \leftrightarrow 931,49410274(42) \text{ MeV}$.

Molu nekateri odrekajo status osnovne enote, ampak ga razumejo le kot velik faktor.

Temperatura je svojevrstna uganka. Pri sobni temperaturi jo merimo preko razpenjanja in krčenja snovi, pri visokih temperaturah pa jo povežemo z barvo. Lahko bi celo oporekali pravo naravo osnovne enote, saj je pravzaprav le mera za povprečno termično energijo gradnikov snovi. Z znanstvenega vidika je glavna prednost redefinicije kelvina, da bo omogočala bolj točne meritve pri zelo nizkih in zelo visokih temperaturah. Ima tudi načelno prednost, saj ne temelji na nobeni specifični snovi. Pred redefinicijo je bila temperatura trojne točke vode točno določena, Boltzmannova konstanta pa merjena količina $k = 1,38064903(51) \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$, z relativno standardno negotovostjo $3,7 \cdot 10^{-7}$. Zdaj postane Boltzmannova konstanta točna, z negotovostjo nič, temperatura trojne točke pa $273,1600(1) \text{ K}$. Redefinicija kelvina nima takojšnjega vpliva na ITS-90. Najbolj točne meritve v območju med 25 K in 1235 K so še vedno sledljive na standardne platinaste uporovne termometre. Vrednost temperature trojne točke vode se ne bo spremenila v bližnji prihodnosti. Na dolgi rok termodinamično merjenje temperature lahko zamenja klasične termometre in ITS-90 temperaturno lestvico.

Definicija ampera je nekdamer slonela na definiciji enot časa, razdalje in mase. Volt in ohm sta bila naslonjena na definicijo ampera preko Ohmo-

vega zakona, vendar nista med seboj neodvisni količini, saj ju povezuje kvantni Hallov pojav in Josephsonov pojav. Po novem je amper naslonjen na definicijo sekunde in določeno vrednost osnovnega naboja. Volt in ohm določa Planckova konstanta, osnovni naboj in Ohmov zakon. Planckova konstanta je določena z definicijo kilograma. Zaradi redefinicije se spremenita vrednosti Josephsonove in van Klitzingove konstante. Enota volt je praktično realizirana preko Josephsonovega pojava in Josephsonove konstante $K_J = \frac{2e}{h} = 483\,597,848416984 \text{ GHz/V}$. Vrednost konstante je zdaj določena, prejšnja pa je bila izmerjena $K_{J-90} = 483\,597,9 \text{ GHz/V}$. Nova konstanta je manjša od prejšnje in novo definirana napetost je manjša od stare za faktor $0,1 \mu\text{V/V}$. Ohm je realiziran preko kvantnega Hallovega pojava in van Klitzingove konstante $R_K = \frac{h}{e^2} = 25\,812,8074593045 \Omega$. Od stare konstante $R_{K-90} = 25\,812,807 \Omega$ je to večje za faktor $0,02 \mu\Omega/\Omega$. Ta sprememba je zanemarljiva za večino uporabnikov, upoštevati jo bodo morali le nacionalni meroslovni inštituti, ki vzdržujejo standarde največje točnosti.

Marsikdo oporeka status osnovne enote tudi kandel, saj naj bi bila zgolj biološka enota, ki ustreza človeški zaznavi. V radiologiji shajamo brez posebne enote za svetlobni tok.

Kritika redefinicij se tiče uporabe dogovorjenih konstant, ki niso sorodne definirani količini. Tako je npr. za razumevanje zveze med Planckovo konstanto in maso potrebno poznati kvantne pojave. To pa ne velja za definicijo enote amper, ki je zdaj definirana precej bližje pravemu pomenu toka, ki je pretočen naboj v časovni enoti. Težko razumljive definicije bodo nekoliko otežile srednješolski pouk, je pa že zdaj učni načrt predvideval le obravnavo definicije ampera.

LITERATURA

- [1] G. Girard, *The third periodic verification of national prototypes of the kilogram (1988–1992)*, Metrologia **31** (1994), 317–336.
- [2] T. J. Quinn, *From artefacts to atoms: the BIPM and the search for ultimate measurement standards*, Oxford University Press, 2012.
- [3] *Odredba o merskih enotah*, Uradni list RS, št. 26/01 in 109/09
- [4] SIST-V ISO/IEC Vodilo 99, Mednarodni slovar meroslovja – Osnovni in splošni koncepti ter z njimi povezani izrazi (VIM).
- [5] www.bipm.org/en/publications/mises-en-pratique/, ogled 24. 12. 2018.
- [6] *International Earth Rotation and Reference Systems Service*, dostopno na www.iers.org/ IERS/EN/Home/home_node.html, ogled 25. 12. 2018.