



A KILOGRAMM DETRONIZÁLÁSA

Búcsú egy etalontól

Az idei Metrológus Világnapon, 2019. május 20-án nagy változásokra ébred majd az emberiség. Legalábbis a mértékegységek iránt érdeklődő, remélhetőleg nem csekély része...

A méter eredete a francia forradalom idejére nyúlik vissza. Definícióját a Francia Tudományos Akadémia javaslatára a Föld Párizson áthaladó délkörének hosszára alapozták: legyen 1 méter a délkör hosszának negyvenmilliomod része. A munkát 1793-ban két francia csillagász kezdte el a délkör Dunkerque-től Barcelonáig terjedő, szárazföldre eső részének mérésével, de sok nehézség hátráltatta munkájukat. A háromszögeléshez kitűzött zászlók fehérek voltak, amit akkor a királpártiak színének vélt a fel-dühödött tömeg, délen pedig a kalózok támadtak, így mindkettőjüknek menekülnie kellett. De munkájuk eredményeként elkészült a méteretalon munkapéldánya sárgaréz-ből, amit a Konvent 1795-ben elfogadott és további példányokat rendelt márványból. Ezek egyikét a kép mutatja az Igazságügyi Palota épületén [1].

A méter után a kilogramm következett. Első meghatározása (1795) szerint annyi víz tömegével egyenlő, ami egytized méter élhosszú kockába a víz fagyáspontján befér. Gyakorlatilag ez egyúttal a térfogat egységének (liter) a definíciója volt. De 1799-re, amikor a kilogramm etalonját is megrendelték, a definíció 1 liter 4°C hőmérsékletű (legnagyobb sűrűségű) víz tömegére módosult. A kivégzett XVI. Lajos ékszerésze 4-4 db méter és kilogramm etalont készített finomított platinából, amelyek közül egyet-egyét a Köztársasági Archívumban helyeztek el.

1. ábra. Méteretalon emléke (Párizs, Vendome tér 11-13.) [1]



1867-ben a párizsi világiállításon összegyűlt tudósok, a Szentpétervári Tudományos Akadémia és a Nemzetközi Geodéziai Szövetség javaslatára létrehoztak egy Nemzetközi Méterbizottságot (Commission Internationale du Mètre). Ez 1872-ben alakult meg, és új etalonokat rendelt 90% platina, 10% iridium ötvözetből; a méter etalont X alakú keresztmetszettel készítette el a nagyobb merevség érdekében. 1875-ben a nemzetközi méteregyezmény aláírásával szélesebb hatáskörű bizottság jött létre, a BIPM (Bureau International Poids et Mesures, angolul International Bureau of Weights and Measures, magyarul Nemzetközi Súly- és Mértékügyi Hivatal).

A BIPM a további etalonok jóváhagyását az Általános Súly- és Mértékügyi Konferencia — (Conférence Générale des Poids et Mesures, CGPM, angolul General Conference on Weights and Measures) — hatáskörébe utalta. Az első CGPM 1889-ben szentesítette a kilogramm nemzetközi prototípusát (IPK): 90% platina- 10% iridium-ötvözetből készült henger, amelynek magassága és átmérője kb. 39 mm. A BIPM működése helyszínéül kijelöltek egy pavilont Párizs egyik elővárosában, Sèvres-ben, ahol mind a méter, mind a kilogramm etalonját őrzik. Az etalonokhoz, ill. hiteles másolataikhoz való hozzáférést a Súlyok és Mértékek Nemzetközi Bizottsága (CIPM) szigorúan felügyeli [1].

A méteregyezmény aláírói között ott volt az Osztrák–Magyar Monarchia részéről

2. ábra.
A Nemzetközi Súly-
és Mértékügyi Hivatal pecsétje



Apponyi Rudolf párizsi nagykövet is, amivel jogot szerztünk a méter- és a kilogrammetalon egy-egy példányára. A BIPM, CGPM és CIPM – nevében történeti okok folytán – a súly szó szerepel, mivel a súly és a tömeg közötti különbségtétel a CGPM harmadik konferenciáján, tehát csaknem negyven évvel később született meg. 1892 és 1941 között a BIPM és egyes nemzeti laboratóriumok kilenc alkalommal ellenőrizték a méteretalon méretét, és az eltérések kisebbek voltak $0,3\mu\text{m}$ -nél [1].

A mértékegységek újradefiniálása 1948-ban kezdődött, amikor a CGPM elrendelte a kripton-86, a higany-198 és a kadmium-114 izotópok spektrumának vizsgálatát abból a célból, hogy a métert egy fizikai állandó segítségével határozzák meg. A pontosság növelésének újabb indokot adott az űrhajózás megjelenése. A CGPM 11. konferenciáján 1960-ban létrehozták az SI (Système International d'Unités, angolul International System of Units) nemzetközi



3. ábra. IPK, a kilogramm nemzetközi etalonja Sèvres-ben [4]

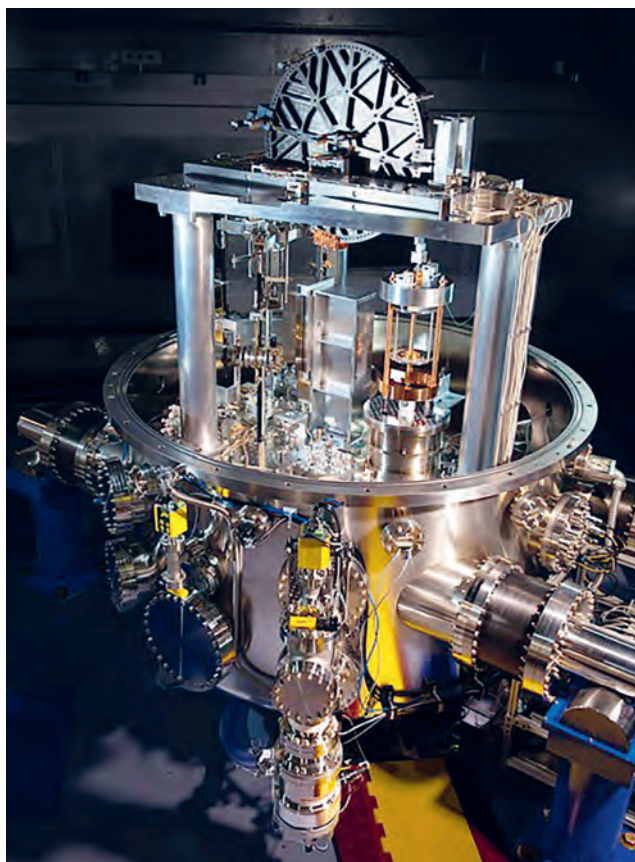
mértékegységrendszert, és újradefiniálták a métert, ami ettől kezdve a *^{86}Kr atom $2p_{10}$ és $5d_5$ energiaszintje közötti átmenetnek megfelelő, vákuumban terjedő sugárzás hullámhosszának $1\,650\,763,73$ -szorososa* lett. Így az emberkéz alkotta műtárgy helyett egy természeti állandó definiálta a métert. Ugyanekkor úgy határoztak, hogy kalória helyett Joule-t (J), atmoszféra helyett Pascal-t (Pa) kell használni. A 17. CGPM konferencia 1983-ban újra megváltoztatta a méter (m) definícióját [2]. Ekkor a fény

sebességét $299\,792\,458$ m/s értékben rögzítették, majd a métert úgy definiálták, mint az a távolság, amit a fény vákuumban megtesz a másodperc $1/299\,792\,458$ -ad része alatt. A másodpercet már 1967-ben a cézium 133-as izotópjának mikrohullámú frekvenciája alapján definiálták. A változtatásokat – az USA kivételével, ahol a métert nem vezették be – széles körben elfogadta a tudományos és a műszaki világ.

A CGPM 2018. november 16-án tartotta 26-ik konferenciáját Versailles-ban [3, 4], ahol 59 nemzet metrológus képviselői egyhangúlag megszavazták négy alapegység, a kilogramm, az amper, a Kelvin és a mol újabb definiálását természeti állandók alapján. Az eredmény kihirdetését a jelenlévők felállva tapsolták meg [4].

Az új SI a méternél alkalmazott játékot alkalmazza a sorra kerülő egységekkel. A kilogrammot a Planck-állandóból származtatja, ami a kvantummechanika alapja. Ehhez a Planck-állandót pontosan kell meghatározni. A korábban mozgó tekercses watt mérleg néven ismert eszközt – ami kapcsolatot teremt mechanikai és elektromos erők között – Brian Kibble találta fel Anglia mérésügyi intézetében (National Institute of Physics, NPL) [5], és az ő tiszteletére ma Kibble-mérlegnek nevezik. A NIST (National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, USA) és az NPL eredményei alapján a Kibble-mérleg alkalmasnak bizonyult a volt és az ohm kvantum-meghatározására [6]. Ezután a Kibble-mérleg megmérte az elektromos erőt a Planck-állandó és a frekvencia segítségével, majd kapcsolatot létesített a makroszkópikus tömeg és a Planck-állandó között. Ekkor határozták el a kilogramm újradefiniálását a Kibble-mérleg segítségével [7], és az új definíciók felhasználásával egy újabb SI létrehozását [8]. A Kibble-mérleg alkalmazásához sok elméleti munkát kellett végezni és a mérleg is jelentős fejlesztésen ment át [9]. Nyolc ország nemzeti laboratóriumai készítettek különféle mérlegeket, de maga a NIST is négy modellt fejlesztett ki: az első háromba elektromágnezt, a negyedikbe permanens mágnezt építettek be [10]. Utóbbival a Planck-állandó értékét nagy pontossággal – $6,62607015 \times 10^{-34}$ kg \times m²/s értékben – határozták meg. Mivel a Planck-állandó dimenziójában szerepel a kg, minden olyan mérés, amivel a Planck-állandót határozzák meg, egyúttal a kg mérésére szolgálhat [2].

A változtatás célja az volt, hogy az alapegységeket stabilabbá tegyék, segítségükkel a kísérletezők pontosabb és rugalmasabb módszert alkalmazhassanak az állandók átalakítására és a mértékegységek meghatározására. „Ez az új definíciók szépsége” modja Estefania de Mirandés, egy fizikus, a BIPM metrológusa. „Nem vagyunk többé egyetlen technikára korlátozva”.



4. ábra. Az NIST-4 Kibble-mérleg a Planck-állandót 13 ppb (10^{-9}) pontossággal mérte meg, ami elég pontos a kilogramm újradefiniálásához [11].

Csak hogy ezek a kísérletek sokkal nehezebben kivitelezhetők, mint a fénysebesség mérése. A Kibble mérleg egyik oldalán elhelyezett tömeget a másik oldalon egy mágneses erőterben függő tekercs által létrehozott elektromos erő tartja egyensúlyban. Az egyensúly eléréséhez áramnak kell átfolyni a tekercsen. A kísérletezők a tömeget az átfolyó áram és egy független feszültség szorzatából származtatják, de a feszültség akkor jön létre, amikor eltávolítják a tömeget, és a tekercset fel és le mozgatják a mágneses térben. Az igazi probléma az áram és a feszültség meghatározásában rejlik, amihez a számítás felhasználja az elektron töltését és a Planck állandót. „Miután az új SI rögzíti ezeket az értékeket, a kilogramm meghatározása lehetséges” mondja James Olthoff, az NIST fizikusa [2].

Ugyanakkor még e rejtélyes változtatások hívei is elismerik, hogy ezek megvadíthatják azokat, akik kevéssé jártasak a fizikai állandók világában. „Hogyan fogjuk megtanítani az embereket az új egységek használatára?” kérdi Jon Pratt, az NIST egy másik fizikusa [2]. „Az új bonyolult definíciók kétségbe kergetnek mindenkit,

akinek nincs erős fizikai ismerete”, mondja Gary Price, egy metrológus Sydney-ből aki az Ausztrál Nemzeti Sztenderdek Hivatalának tanácsadója. „Az új SI nem teljesíti a mértékegységrendszer alapvető kritériumát: meghatározni a tömeget, amivel más tömeg mérhető, definiálni a hosszúságot, amivel a hossz mérhető és így tovább. Az új SI sem a súlyoknak, sem a mértékeknek nem rendszere” Price szerint [2].

Metrológusoknak azonban intuitív ötletei is voltak, mondja Olthoff. A kilogrammot, ugyanis lehetne definiálni valamely atom nagyszámú együttesének összesített tömegével is, de ő egy ilyen definíciót nem tartana praktikusnak [2].

Tanárok és középiskolás diákok részére megjelent az új definíciók részletes összefoglalása (Science in School) [12], ami további mértékegységeket is ismertet.

Az időszámítás egységét évszázadokon át csillagászati jelenségekhez kötötték. A másodperc neve egy londoni órás mestertől származik. Az órákon eleinte csak óramutató volt. A hajszálrugó és ingaóra felfedezése tette lehetővé, hogy megbízható percmutatója is legyen az óráknak, a clock-hand mellett a percmutató, a minute-hand nevet kapta. William Clement, 1680 körül feltalálta az ankert (egy gátlószerkezetet) [13] és ettől kezdve másodpercmutatót (second-minute-hand) is lehetett használni, amelynek neve később rövidült second-hand-re. Az ankert az inga vezérli, amelynek hossza határozza meg a lengésidejét. A másodperc elnevezés a latin secundus (= második) származéka.

A 13. CGPM 1967-ben hozott döntése a másodpercet úgy definiálta, mint az alapállapotú cézium-133 atom két hiperfinom energiaszintje közötti átmenetnek megfelelő sugárzási frekvencia ($\Delta\nu_{CS}$) 9 192 631 770 periódusának időtartamát.

Amikor Lord Kelvin megalkotta a róla elnevezett abszolút hőmérsékleti skálát, a Celsius skála beosztását fogadta el. Ezért lett az anyag lehetséges leghidegebb állapotának hőmérséklete $-273,15^\circ\text{C}$. Ma még a Kelvin fok definíciója a víz hármasponti hőmérsékletének ($0,01^\circ\text{C}$ [6]) $1/273,16$ -od része. Mivel a víz nem lehet teljesen tiszta, és oldott anyagok a hármaspontot kismértékben befolyásolhatják, az új SI a Boltzmann-állandót (k) – a gázmolekulák termikus energiáját meghatározó általános érvényű konstans, amelynek dimenziója $(\text{kg} \times \text{m}^2 \times \text{s}^{-2}) / \text{K}$ – használja fel a hőmérsékleti alapegység új definíciójára: $k = 1,380\,649 \times 10^{-23} \text{ J / K}$.

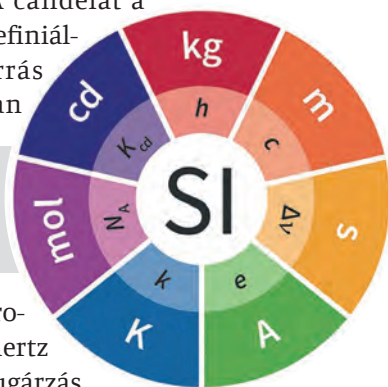
Az áram erősségét (I) az áramvezető keresztmetszetén időegység alatt áthaladó elektromos töltés (Q) nagyságával mérjük: $I = Q/t$, alapegysége a francia fizikus, Ampère neve után amper. Jelenlegi definícióját

MÉRTÉKEGYSÉG	MINŐSÉG	DEFINIÁLÓ ÁLLANDÓ
Kilogramm (kg)	Tömeg	Planck-állandó
Méter (m)	Hosszúság	Fénysebesség
Másodperc (s)	Idő	¹³³ Cézium sugárzási frekvencia
Amper (A)	Áramerősség	Elektron töltése
Kelvin (K)	Hőmérséklet	Boltzmann-állandó
Mol (mol)	Anyag mennyiség	Avogadro-állandó
Candela (cd)	Fényintenzitás	Fényerősség adott frekvencián

Az új SI javaslatának gyűjteménye. A mértékegységek újradefiniálása természetes fizikai állandók alapján.

a 9. CGPM határozta meg 1948-ban: 1 amper olyan állandó elektromos áramerősség, amely két egyenes, párhuzamos, végtelen hosszúságú, elhanyagolhatóan kicsiny kör keresztmetszetű és egymástól 1 méter távolságban, vákuumban elhelyezkedő vezetők között méterenként 2×10^{-7} N (newton) erőt hoz létre. Az amper új SI *definíciója*: $e = 1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$ amper \times s, amiben e – az elektron elemi töltése – az univerzális fizikai állandó.

A fényerősség mértéke a candela, ami nevét a gyertyáról kapta. Korábbi sztenderdje a feketetest sugárzásához volt kötve. A candelát a 16. CGPM 1979-ben definiálta, mint egy fényforrás által adott irányban



5. ábra.
A BIPM nemzetközi
SI logója [12]

kibocsátott monokromatikus, 540×10^{12} hertz (Hz) frekvenciájú sugárzás, amelynek intenzitása $1/683$ watt (W) per steradian. „Nehéz elképzelni? Egy gyertya megközelítően egy candela fényerősséggel világít” írja a Science in School [6]. Más szóval, az 540 THz frekvenciájú ($\lambda = 555$ nm hullámhosszú) monokromatikus sugárzás maximális spektrális hatásfoka 683 lumen/Watt, amelyben a kg, m, s alapegységek rendre a Planck-állandó (h), a vákuumban mért fénysebesség (c) és a céziumfrekvencia ($\Delta\nu_{Cs}$) alapján vannak definiálva.

A mol egy dimenziómentes szám, ami csak azért kerül terítékre, mert korábban kg alapon definiálták, mint az atomok számát $0,012$ kg 12-es tömegszámú szénben. Ez pontosan az Avogadro-szám, az 1 molban lévő atomok száma, ami rögzítésre került $N_A = 6,022\,140\,857 \times 10^{23}$ értékben.

A tudomány és a technika fejlődése, valamint a mérőműszerek pontosságának nagyfokú javulása indokolja a mértékegységek etalonjainak nagy pontosságú meghatározását, s így a BIPM tevékenységét. Állandóbb értékű etalonokat nem lehet találni, mint általános érvényű fizikai állandókat, amelyek nincsenek kivéve műtárgyak időbeli változásának. Az is érthető, hogy a metrológusok által



6. ábra.
William Klement
ankerja [13]

használt tudományos fogalmak sokak számára nem emészthetők. Mégis mi az oka annak, hogy tevékenységük értetlenséget és ellenérzéseket is kelt?

A BIPM és döntéshozó fóruma, a CGPM szükséges és hasznos működése mögött elitista testületek sejlének fel a mindent újratemtés szándékával. Sorozatos újradefiniálásaik nagymértékű publicitás révén szenzációként hatnak, és egyúttal további feladatokkal látják el önmagukat. A kalória és az atmoszféra betiltását nem tartja mindenki indokoltnak és a mértékegy-



6. ábra. 1 candela fényerősség [12]

ségek újradefiniálásától félnek, talán csak a szóhasználat félreértelmezése miatt. Amikor ugyanis a megmért fénysebességet m/s dimenzióban 9 jegy pontossággal rögzítik, szükségszerűen a méterből és a szekundumból kell kiinduljanak (azért, hogy ne változzanak!) és a fénysebességgel a mindennapi életben használt métert nemcsak definiálják, de kalibrálják, hitelesítik is. Hasonlóképpen, amikor a $\Delta\nu_{\text{cs}}$ frekvenciát 1/s egységben 10 jegy pontossággal rögzítik, ehhez figyelembe veszik, hogy mi a másodperc, nehogy megváltozzék az újradefiniálás után. Minden megszokott mértékegység továbbra is használható, a mérőszalagok, mérlegek, hőmérők és órák továbbra is érvényben maradnak, a mindennapi életben semmi nem változik, hála annak a bölcsességnek, amivel a megszokott mértékegységeket megőrizték.

Végül, mi lesz a sorsa a ma még etalonként szolgáló platina-iridium ötvözetből készült IPK-nak, a 130 éve szolgáló (uralkodó) etalonnak, amit a BIPM pavilonja őriz Sèvres-ben? A kilogramm a francia forradalom idején fogant és majdnem száz évet várt, amíg koronát kapott. Ezt most fogják elvenni tőle. Nem lesz olyan tragikus, mint XVI. Lajos trónfosztása. A kilogramm csak felmenője, a méter sorsára jut, de jobban jár, mint leszármazottja, az atmoszféra, amit száműztek. Az IPK-t eddig 40 évente vették elő, hogy hasonló etalonokat kalibráljanak a világ országai számára. Ezután mi lesz vele?

„Megtartjuk, mint a tömeg másodlagos sztenderdjét”
mondja de Mirandés [2].

Vagyis érdemei elismerése mellett nyugdíjazták és polgári rangot kap. 2019. május 20-tól *Kilogramm Emeritus* lesz. Ez azonban a királyi udvar megszűnésével

is együtt jár, hiszen az etalonként definiált természeti konstansokat nehéz lenne kiállítani. Ezentúl a Sèvres-i pavilon valószínűleg csak múzeum lesz, és azt felügyelő Súlyok és Mértékek Nemzetközi Bizottsága (CIPM) teremőrré válik. Így az elit szervezetek is közelebb kerülnek a mindennapi élethez.

SIMONYI MIKLÓS



A szerző köszönetet mond a téma megvitatásáért Mayer Istvánnak (fizikus), Schiller Róbertnek (vegyész) és Simonyi Gábornak (matematikus).

IRODALOM

1. <https://hu.wikipedia.org/wiki/Méter>
2. A. Cho, *Science*, 7 November 2018, **362**, 6415, 625–626,
3. *The Economist*, 16 November 2018
4. *Chem & Eng News*, 16 November 2018
5. Kibble B P, A measurement of the gyromagnetic ratio of the proton by the strong field method, in *Atomic Masses and Fundamental Constants* vol. 5, ed. J. H. Sanders, A. H. Wapstra (New York: Plenum), **1976**, pp 545–551.
6. Kibble, B. P, Robinson, I. A, Belliss, J. H, A realization of the SI watt by the NPL moving-coil balance, *Metrologia* **27**, 1990, 173–192.
7. Mills, I. M, Mohr, P. J, Quinn, T. J, et al, Redefinition of the kilogram: a decision whose time has come, *Metrologia* **42**, 2005, 71–80.
8. Richard, P, Fang, H, Davis, R, Foundation for the redefinition of the kilogram, *Metrologia* **53**, 2016, A6–A11.
9. Robinson, I. A, Schlamminger, S, The watt or Kibble balance: a technique for implementing the new SI definition of the unit of mass, *Metrologia*, 28 September 2016, Volume 53, No. 5, A46–A74.
10. Haddad D, Seifert F, Chao L, et al. First measurements of the flux integral with the NIST-4 watt balance, *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **64**, 2015, 1642–1649.
11. https://en.wikipedia.org/wiki/Kibble_balance
12. SI units: a new update for standards, *Science in School*, 30 november 2018, www.scienceinschool.org
13. <https://hu.wikipedia.org/wiki/Másodperc>

KÖVETKEZŐ SZÁMUNKBÓL

SZABADOS LÁSZLÓ: 100 éves a Nemzetközi Csillagászati Unió

MIKA JÁNOS – MITRE ZOLTÁN – ZOMBORI PÉTER: Bekövetkezett katasztrófák tanulságai

TRÁJER ATTILA: Szúnyogok viselkedése

VENETIANER PÁL: 150 sor a XXI. századi tudományról – Módszertani forradalom négy tételben

BABINSZKI EDIT: Pillantás a föld alá – térképekkel