

A hétköznapi életben szerencsére nincs szükség ilyen pontosságra, azonban a tudomány további fejlődéséhez igen. Ezért vált szükségessé az említett elszakadás, aminek eredményeként az alapmennyiségek definíciói elvonttá, a tanulók és nem szakemberek számára felfoghatatlanná váltak. Így van ez akkor is, ha a régi alapegységek az újakkal egyértelmű, viszonylag egyszerű kapcsolatba hozhatók, mert a kapcsolatok hátterét mély fizikai törvények adják. Ezért felmerül a kérdés, hogy mit tanítsunk a különböző fokú iskolákban az alapmennyiségek mértékegységeiről.

Ahogy fent megjegyeztem, az SI alapmennyiségeinek korábbi definiálásához szükséges mennyiségek és állandók értékei a hétköznapiakban szükséges pontosságon belül változatlanok maradtak. Ezért úgy vélem, hogy a nem fizikusok és fizikatanárok utánpótlását célzó oktatásban felesleges az új SI tárgyalása. A fizikai világszemlélet elsajátításához a fizikai mennyiségek, mint gondolati elemek elsajátítása szükséges, amelyekben a mérőszámok és mértékegységek szerves egységén van a hangsúly. Ebben az értelemben a mértékegységek pontos meghatározása a hétköznapi mérőeszközök pontosságával a rámutatás erejéig elegendő: „a stopperóra szerint ennyi ideig tart egy másodperc”, „a mérőrudon ilyen hosszú egy méter”, „ekkora tömeg éppen egy kilogramm” (amelyet érzékelné súly alapján tudunk), „a hőmérő

szert ennyi egy kelvin hőmérsékletváltozás”, „ennyi vízben ugyanannyi molekula van, mint ahány atom 12 g szénben”, „az árammérő szerint itt most éppen egy amper elektromos áram folyik”. A fényintenzitás kilóg a sorból, mert mérésére csak közvetett lehetőségünk van, ugyanis a fénymérők fényáramsűrűséget (egysége 1 lux = 1 lm/m<sup>2</sup>) mérnek.

Az ilyen rámutatás alapját az képezi, hogy a testek meghatározott fizikai tulajdonságaik alapján ekvivalenciaosztályokba sorolhatók, amelyeket egyetlen reprezentáns elemük egyértelműen képvisel. A mértékegység kijelöléséhez csupán ki kell választani egy osztályt, amelynek tetszőleges képviselője lesz a mértékegység. A rámutatáson alapuló definícióhoz azonban már középfokon is érdemes kiegészítésként hozzátenni, hogy az SI alapegységeit olyan egyetemes fizikai állandók értékének abszolút pontos megadása adja, amelyek helytől és időtől függetlenek. Ezek segítségével az alapmennyiségek mértékegységei is abszolút pontossággal adhatók meg, és így a rámutatáson alapuló mértékegységek pontossága véges, nem abszolút.

#### Irodalom

1. Horváth Dezső: Kedvenc mértékegységeim. *Fizikai Szemle* 57/4 (2007) 127–131.
2. Bureau International des Poids et Mesures: *26<sup>e</sup> CPMG: Résolutions adoptées*. Versailles 13–16 novembre 2018.

## VERSAILLES-TÓL VERSAILLES-IG – DEBRECEN ÉRINTÉSÉVEL

### Az SI mértékrendszer reformja – 1. rész

Király Beáta

MTA Atommagkutató Intézet, Debrecen

Angeli István

Debreceni Egyetem, Kísérleti Fizikai Tanszék

#### Versailles-tól Versailles-ig

A mértékegységek egységesítéséről Párizs jut eszünkbe, induljunk el azonban egy másik francia városból, Versailles-ból. A fényűzése miatt Napkirálynak is nevezett XIV. Lajos (uralkodott 1643–1715) tette meg Versailles-t királyi rezidenciává, és ezt a státusát a kastély megőrizte egészen a Nagy Francia Forradalomig



Király Beáta az MTA Atomki tudományos titkára. Matematika-fizika szakon végzett a Debreceni Egyetemen; neutronfizikával, majd töltött részecske-indukált magreakciók hatáskeresztmetszetének vizsgálatával foglalkozott. Jelenleg pályázati projekteket koordinál és az Atomki ismeretterjesztő tevékenységét irányítja, az intézetbe érkező látogatócsoportok programjárt is felel.



Angeli István a Debreceni Egyetem ny. egyetemi tanára. Az ELTE TTK fizikus szakán végzett 1955-ben. Részt vett azokban a kísérletekben, amelyek a magyarországi szene urántartalmának elődúsítására irányultak. Munkatársaival totális neutron-hatáskeresztmetszeteket mért; az értelmezéshez kifejlesztették az optikai modell félklasszikus változatát. A töltéssugárban héj- és deformációs effektusokat tártak fel. 2004-ben és '13-ban magsugártáblázatokat közölt az *Atomic Data and Nuclear Data* folyóiratban.

(1789). Versailles pompás palotáját és parkját számos európai uralkodó és főnemes tekintette mintának. Létrehozása és fenntartása rengeteg költséget emésztett fel, de szerencsére a királynak volt egy tehetséges pénzügyminisztere, *Jean-Baptiste Colbert* (hivatalban 1665–1683). Colbert komolyan vette feladatát és célul tűzte ki – többek között – a francia manufaktúrák fejlesztését. A megtermelt javak értékesítését azonban



1. ábra. A méter tiszteletére 1800-ban vert érme; felirata: „à tous les temps, à tous les peuples”, azaz „minden időnek, minden népnek”.

jelentősen megnehezítette, hogy a francia hercegségek és grófságok különböző mértékrendszereket használtak, amiktől nem voltak hajlandók eltérni.

A felvilágosodás eszméinek terjedésével divatossá vált a természettudománnyal való foglalatzkodás, és a tehetős úri családok körében létrejöttek a házi laboratóriumok. Néhányan oly mélyen beleásták magukat e munkába, hogy egzakt méréseket is végeztek. Közülük kiemelkedett *Antoine Laurent de Lavoisier* (1743–1794), aki először foglalkozott komolyan a kémiai reakciók során tapasztalható tömeg- és térfogatviszonyok törvényszerűségeivel. A kor másik nagyhatású egyénisége, *Voltaire* (1694–1778) a maga nézeteivel sokak ellenszenvét kivívta, és csak kevesen tudják róla, hogy *Newton* tanait Franciaországban ő terjesztette el. A felpezsdülő tudományos-szellemi élet létrehozta az igényt egy mindenki számára hozzáférhető, egységes mértékrendszer bevezetésére.

1789. július 14-én Párizsban kitört a forradalom. Augusztus 4-én éjszaka az Alkotmányozó Nemzetgyűlés eltörölte a főúri monopóliumokat, ezzel a sok-sok önálló vám-, mérték- és súlyrendszert. Egész Franciaországra kiterjesztették az „egy király, egy súly, egy mérték” elvét. 1790-ben a mértékrendszer megújításáról szóló javaslat került a Nemzetgyűlés elé, ebben szerepel először a *mètre*, azaz a méter szó. E javaslatban fogalmazódott meg a decimális felosztás igénye is, ami szintén forradalmi áttörésnek számított. Ezen ma már csodálkozunk, hiszen természetesnek vesszük a tízes alapú rendszert. Régen azonban nem volt magától értetődő, és ha belegondolunk, életünknek még ma is van olyan része, ahol nem tízes alapon számolunk (1 perc = 60 másodperc, 1 óra = 60 perc, 1 nap = 24 óra).

1791-ben a Francia Akadémia (alapítva 1634-ben) javaslatot tett a méter definíciójára. Korábban felmerült, hogy az inga lengésével határozzák meg a métert: legyen 1 méter azon inga hossza, amelynek lengésideje egy adott idő. Ezt azonban elvetették, mivel a hosszúság egységét az idő egységéből származtatná, így nem lenne attól független. Majd megszületett a definíció: legyen a méter a Föld negyed-délkörének tízmilliomod része. Miért pont ennnyied része? Mert így a méter egy emberi léptékű méret lett. Lavoisier, aki részt vett a méterrendszer megalkotásában, ezt írja:

„Soha nagyobbbat, egyszerűbbet, koherensebbet ember nem alkotott.”

A méterrendszer bevezetésének jelentőségét nem lehet túlhangsúlyozni. Ennek emlékére 1800-ban érmét vertek, amelynek felirata: „minden időnek, minden népnek” (1. ábra). Ez kifejezi egyrészt az időbeli stabilitást, azaz hogy ma és holnap is ugyanazt a hosszt jelentse, másrészt a térbeli stabilitást és hozzáférhetőséget, azaz hogy a földkerekség bármely pontján ugyanazt a hosszt értsék alatta.

Nemrégiben Versailles újra a figyelem középpontjába került, legálábbis a mérésügyi szakemberek körében. 2018. november 13–16. között itt rendezték meg a 26. Általános Súly- és Mértékügyi Értekezletet (francia rövidítése után a továbbiakban CGPM), ami igen jelentős változásokat hozott a korábbiakhoz képest [1]. Jelen cikk az ide vezető út néhány lépését kívánja bemutatni, a 2018 decemberében Atomki-szeminárium keretében elhangzott előadás [2] nyomán.

## Mértékrendszerváltás

Az SI mértékegységrendszert (Système International d’Unités) a 11. CGPM 1960-ban fogadta el, amit Magyarország lényegében azonnal átvett, majd 1976-ban egy minisztertanácsi rendelet kötelezővé is tette használatát. Érdekes, hogy az USA-ban és néhány más országban máig nem tették kötelezővé az SI használatát, így a hétköznapi életben hivatalosan is találkozhatunk más egységekkel; a tudományos élet nemzetközisége azonban ma már mindenhol megköveteli az SI-t.

Korábban a műszaki-tudományos életben a CGS rendszert, majd az MKSA rendszert alkalmazták. A CGS rendszer a centiméter, gramm, szekundum mennyiségeket tekintette alapnak, míg az MKSA rendszer a méter, kilogramm, szekundum és amper mennyiségeket. A jelenlegi SI alapegységek a méter, kilogramm, szekundum, amper, kelvin, mol és candela.

A 24. CGPM 2011-ben hozott határozata szerint a mértékegységeket általános fizikai állandókkal fogják definiálni, ehhez 2018-ban *bét általános természeti állandó értékét rögzítik*. A hét közül kettő, a cézium-133 hiperfinom-szerkezeti átmenete során kibocsátott fény  $\nu_{cs}$  frekvenciája és a fény  $c$  sebessége már korábban is mérési bizonytalanság nélkül rögzített értékű volt, a fennmaradó öt pedig a tavalyi mérésügyi értekezleten nyerte el végleges értékét: a  $h$  Planck-állandó, az  $e$  elemi töltés, a  $k$  Boltzmann-állandó, az  $N_A$  Avogadro-állandó és  $K_{cd}$  az 540 Hz frekvenciájú monokromatikus sugárzás fényhasznosításának értéke. Innentől tehát ezekhez a fizikai állandókhöz már nem adunk meg mérési bizonytalanságot.

A 26. CGPM határozata szerint a mértékegységek új definíciója, az új SI 2019. május 20-tól lép életbe.

## Az áttérés

Egy fizikai mennyiséget egy számértékkel és egy mértékegységgel adunk meg:

$$\text{fizikai mennyiség} = \{\text{számérték}\} [\text{egység}], \\ \text{vagyis } q = \{q\} [q].$$

Az áttérés előtt bármely mértékegységet még az alappennyiségnek számító méter, kilogramm, szekundum, amper, kelvin, mol és candela hatványai segítségével írhatunk fel. Az egyszerűség kedvéért tekintsük most csak az első három alappennyiséget, amelyek történetét később majd ki is fejtjük:

$$[q] = m^{p_1} \text{ kg}^{p_2} \text{ s}^{p_3},$$

ahol  $p_1, p_2$  és  $p_3$  a megfelelő hatványkitevők, amelyekből képezhető a  $\mathbf{v}_q$  kitevővektor:

$$\mathbf{v}_q = \begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{pmatrix}.$$

Az áttérés előtti SI rendszer tengelyeit az áttérés előtti alapegységekhez tartozó kitevővektorok adják:

$$\mathbf{v}_m = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{v}_{\text{kg}} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{v}_s = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Az áttérés után a Cs-133 frekvenciája, a fénysebesség és a Planck-állandó lépnek az előbbi alappennyiségek helyébe. Ezek kitevővektorai az áttérés előtti (m, kg, s) rendszerben:

$$\mathbf{v}_{\nu_{\text{Cs}}} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{v}_c = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{v}_h = \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ -1 \end{pmatrix}.$$

Amikor áttérünk az új alappennyiségekre (azaz az új bázisra), megköveteljük, hogy annak elemei függetlenek legyenek (azaz egyik sem állítható elő a fennmaradók lineáris kombinációjaként) és megköveteljük a teljességet (azaz tetszőleges mértékegység kifejezhető a bázis elemei segítségével), amit matematikailag így fogalmazhatunk:

$$a_1 \mathbf{v}_{\nu_{\text{Cs}}} + a_2 \mathbf{v}_c + a_3 \mathbf{v}_h = \mathbf{0}$$

akkor és csak akkor, ha

$$a_1 = a_2 = a_3 = 0.$$

Ellenőrizhető, hogy a fentiek teljesülnek, azaz a  $(\mathbf{v}_m, \mathbf{v}_{\text{kg}}, \mathbf{v}_s)$  bázisú alternatív bázisa a  $(\mathbf{v}_{\nu_{\text{Cs}}}, \mathbf{v}_c, \mathbf{v}_h)$ , továbbá ez a teljes vektorteret adó hét régi és hét új mennyiség esetén is igaz. Ezért nyugodt szívvel áttérhetünk az új rendszerre.

Az új rendszerben a  $[q]$  mértékegység a következőképpen írható:

$$[q] = [\mathbf{v}_{\text{Cs}}]^{s_1} [c]^{s_2} [h]^{s_3},$$

ahol  $s_1, s_2$  és  $s_3$  az új hatványkitevők, ezekből képezhető a  $\mathbf{w}_q$  új kitevővektor:

$$\mathbf{w}_q = \begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{pmatrix}.$$

Milyen közlekedési szabályok érvényesek a két rendszer között, azaz hogyan térünk át egyikről a másikra? A következő mátrixművelet viszi át a régi rendszerbeli vektorkomponenseket az új rendszerbeli vektorkomponensekbe:

$$\begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & 1 & -1 \\ 1 & -2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{pmatrix}.$$

Lássuk példaként, hogyan alakul a kg az új rendszerben, ha tudjuk, hogy a régi rendszerben  $p_1 = 0, p_2 = 1$  és  $p_3 = 0$ .

$$\begin{pmatrix} -1 & 1 & -1 \\ 1 & -2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ -2 \\ 1 \end{pmatrix},$$

azaz

$$\text{kg} = [\mathbf{v}_{\text{Cs}}] [c]^{-2} [h].$$

Akit ennél részletesebben is érdekel az áttérés formális matematikai háttere, annak figyelmébe ajánljuk Peter J. Mohr 2008-ban megjelent cikkét [3] a *Metrologia* című folyóiratban. Általában is ajánlható ez a folyóirat, amely fizikus körökben nem nagyon ismert, pedig méréskiértékelésre, számlálásisebesség-mérésre vonatkozó igen hasznos cikkek is megjelennek itt.

## A következő részben

Elindultunk Versailles-ból és visszatértünk Versailles-ba bemutatva az SI mértékrendszer áttérését a fizikai állandók által definiált alappennyiségekre. A következő részben áttekintjük a méter, a kilogramm és a szekundum mérésügyi történetét és kiderül, mi köze van mindehhez Debrecennek.

## Irodalom

1. <https://www.bipm.org/utis/en/pdf/CGPM/Convocation-2018.pdf#page=25>
2. Angeli István: Versailles-tól Versailles-ig – Debrecen érintésével. Az SI mértékrendszer reformja. *Atomki szeminárium* 2018-12-20, videó: <https://www.youtube.com/watch?v=cSmBNCluCW9>
3. Peter J. Mohr: Defining units in the quantum based SI, *Metrologia* 45 (2008) 129–133.