

# MIT KEZDJÜNK AZ ÚJ NEMZETKÖZI MÉRTÉKEGYSÉGRENDszerREL?

Trócsányi Zoltán

Eötvös Loránd Tudományegyetem, Elméleti Fizikai Tanszék

A fizikai gondolkodásmód alapját a fizikai mennyiségek képezik. Bármely fizikai mennyiségnek két lényeges része van: a mérőszám és a mértékegység. A helyes fizikai gondolkodást azzal lehet kialakítani, ha sikerül elfogadni a két dolog szerves egységét. Nem elegendő a mérőszámokkal számítási műveleteket végezni. Az is könnyen félrevezető lehet, ha a fizikai mennyiségnek csupán a jelét tekintjük a mennyiséget képviselő elemnek valamely fizikai egyenletben, bár a mérőszám és mértékegység egyetlen jelbe olvasztása is hangsúlyozza a két elem egységét.

Adott fizikai mennyiség esetén a mérőszám nagyságát a mértékegység határozza meg, tehát az utóbbit nagyon pontosan kell definiálnunk. Ugyanarra a fizi-

kai mennyiségre vonatkozó mértékegységre többféle definíció adható. Ebből a szabadságból néha vicces, időnként komoly félreértések adódnak (lásd például *Horváth Dezső* cikkét a *Fizikai Szemlében* [1]). A mértékegységek egységesítésének és pontos definíciójának jelentőségét a Francia Forradalom idején ismerték fel, és az első metrikus rendszert 1799-ben vezették be. 1875-ben alakult meg az Általános Mértékügyi Értekezlet, amely 1960-ban alkotta meg a Nemzetközi Mértékegységrendszert (SI). Az értekezlet rendszeresen összeül, és a különböző mennyiségek mérési pontosságának javulását figyelembe véve pontosítja az egységek definícióját. Ez történt 2018 őszén is, amikor az SI alapegységeinek jelentős újradefiniálása történt [2]. Az új meghatározások az SI történetének talán legnagyobb horderejű változását jelentik. Az új szabályzat 2019. május 20-án lép életbe, ezért időszerű elgondolkozni azon, hogy mit kezdjünk az új SI-vel.

Természetesen a tudományos és műszaki életben az új SI alapegységeit tudomásul vesszük, hiszen nem jelentenek mást, mint a korábban definiált alapegységek kicserélését olyan természeti állandók értékének abszolút pontos meghatározására, amelyekről jelenlegi tudásunk alapján azt mondhatjuk, hogy a Világ-



*Trócsányi Zoltán* fizikus, az MTA rendes tagja, az ELTE Elméleti Fizika Tanszékének egyetemi tanára, az erős kölcsönhatás elméletének nemzetközileg elismert kutatója. *Demény András*sal társszerzője a *Fizika I.* egyetemi tankönyv Mechanika részének, *Horváth Dezső*vel pedig a *Bevezetés az elemi részek fizikájába* című, 2019-ben angolul is megjelent tankönyvnek. Emellett ismeretterjesztő előadások és művek rendszeres szerzője. Tudományos közleményeire százezer-nél több független hivatkozást kapott.

egyetemben helytől és időtől független állandók. Az új rendszer szerint:

1. a cézium-133 atom alapállapotának finomszerkezeti felhasadásában mérhető energiaszintek közötti átmenet frekvenciája  $\Delta\nu_{Cs} = 9\,192\,631\,770$  Hz;
2. a fénysebesség üres térben  $c = 299\,792\,458$  m/s;
3. a Planck-állandó  $h = 6,626070\,15 \cdot 10^{-34}$  J s;
4. az elemi töltés  $e = 1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19}$  C;
5. a Boltzmann-állandó  $k_B = 1,380\,649 \cdot 10^{-23}$  J/K;
6. az Avogadro-állandó  $N_A = 6,022\,140\,76 \cdot 10^{23}$  mol<sup>-1</sup>;
7. az  $540 \cdot 10^{12}$  Hz frekvenciájú monokromatikus fényt kibocsátó fényforrás fényhasznosítási értéke (spektrális hatásfoka, vagy egységnyi kisugárzott teljesítményre eső fényárama)  $K_{cd} = 683$  lm/W.

Két dolgot fontos hangsúlyozni. Egyrészt az *SI alaplammennyiségei nem változtak*. Így a fenti alapegységek meghatározásában szereplő hertz (Hz), joule (J), coulomb (C), lumen (lm) és watt (W) mértékegységek a másodperc (s), méter (m), kilogramm (kg), amper (A), kelvin (K), mól (mol) és candela (cd) mértékegységekkel a megszokott módon fejezhető ki: Hz = s<sup>-1</sup>, J = kg m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>, C = A s, lm = cd m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup> = cd sr és végül W = kg m<sup>2</sup>/s<sup>3</sup>. Másrészt az új alapegység definíciókban a hangsúly az abszolút pontosságon van, amelyet azonban olyan módon határoztak meg, hogy a metrikus mértékrendszerben, az eredetileg bevezetett SI-ben elfogadott hagyományokhoz ragaszkodtak.

Tehát az *SI alaplammennyiségeinek korábbi definiáláshoz szükséges mennyiségek és állandók értékei a hétköznapi életben szükséges pontosságon belül változatlanok maradtak* (szintén 2019. május 20-tól):

- a nemzetközi kilogrammetalon tömege  $m_{etalon} = (1 \pm 10^{-8})$  kg, ahol a relatív bizonytalanság az új meghatározás elfogadásának idején a Planck-állandó mérési pontosságából származtatott bizonytalanság, és értéke a jövőben elvégzett pontosabb mérések esetén a most megadott relatív bizonytalanságon belül változhat;
- az üres tér  $\mu_0 = (4\pi \pm 2,3 \cdot 10^{-3}) \cdot 10^{-7}$  H/m mágneses permeabilitása, ahol a relatív bizonytalanság az új meghatározás elfogadásának idején az  $\alpha$  finomszerkezeti állandó mérési pontosságából származtatott bizonytalanság, és értéke a jövőben elvégzett pontosabb mérések esetén a most megadott relatív bizonytalanságon belül változhat (H = henry);
- a víz  $T_{hp} = (273,16 \pm 3,7 \cdot 10^{-7})$  K hármasponti hőmérséklete, ahol a relatív bizonytalanság az új meghatározás elfogadásának idején a Boltzmann-állandó mérési pontosságából származtatott bizonytalanság, és értéke a jövőben elvégzett pontosabb mérések esetén a most megadott relatív bizonytalanságon belül változhat;
- a szén-12  $M(^{12}C) = (12 \pm 4,5 \cdot 10^{-7}) \cdot 10^{-3}$  kg/mol moláris tömege, ahol a relatív bizonytalanság az új meghatározás elfogadásának idején az Avogadro-állandó mérési pontosságából származtatott bizonytalanság, és értéke a jövőben elvégzett pontosabb mérések esetén a most megadott relatív bizonytalanságon belül változhat.

Az új SI alapegységei közül csak négy új, három már korábban bevezetésre került hasonló szellemben. Az *alaplammennyiségek mértékegységeinek definíciója* az új SI-ben a következő:

1. az idő (jele  $t$ ) mértékegysége a másodperc, (jele s, de a hétköznapi használatban az mp is elfogadható), amely meghatározása szerint az alapállapotú cézium-133 atom két hiperfinom energiaszintje közötti átmenetnek megfelelő sugárzás 9 192 631 770 periódusának időtartama;
2. a távolság (jele  $l$ ) mértékegysége a méter, (jele m), amely meghatározása szerint annak az útnak a hosszúsága, amelyet a fény üres térben a másodperc 299 792 458-ad része alatt megtesz;
3. a tömeg (jele  $m$ ) mértékegysége a kilogramm (jele kg), amely meghatározása szerint akkora, hogy a Planck-állandó értéke pontosan  $6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34}$  kg m<sup>2</sup>/s;
4. az elektromos áram (jele  $I$ ) mértékegysége az amper (jele A), amely meghatározása szerint akkora, hogy pontosan  $1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19}$  A s az elemi töltés értéke;
5. a hőmérséklet (jele  $T$ ) mértékegysége a kelvin (jele K), amely meghatározása szerint akkora, hogy pontosan  $1,380\,649 \cdot 10^{-23}$  kg m<sup>2</sup>s<sup>-2</sup>K<sup>-1</sup> a Boltzmann-állandó értéke;
6. az anyagmennyiség (jele  $n$ ) mértékegysége a mól (jele mol), amely meghatározása szerint pontosan  $6,022\,140\,76 \cdot 10^{23}$  darab elemi egységet (atomot, molekulát, iont, elektront, vagy más jól meghatározott részecskét) jelent, tehát az Avogadro-állandó értéke pontosan  $6,022\,140\,76 \cdot 10^{23}$  db/mol;
7. az adott irányban mért fényintenzitás (jele  $I_v$ ) mértékegysége a candela (jele cd), amely meghatározása szerint az 1 cd fényintenzitású,  $540 \cdot 10^{12}$  Hz frekvenciájú monokromatikus fényt kibocsátó fényforrás  $K_{cd}$  fényhasznosítási értéke pontosan 683 lm/W (tehát sugárzási teljesítménye  $P = 1/683$  W/sr, mert  $I_v = K_{cd} P$ ). Vegyük észre, hogy minden olyan alaplammennyiség mértékegysége, amely más mértékegységre támaszkodik, csak korábban meghatározott (alacsonyabb sorszámú) mértékegységet használ.

Látjuk, hogy az alapegységek és az alaplammennyiségek egységei elszakadtak egymástól, ami lényeges történelmi pillanatot fejez ki a fizikában. A metrikus rendszer bevezetésekor még sokkal szűkebb ismeretek voltak a fizikai jelenségekről, különösen az elektromosság és a mikrovilág törvényeiről, hiszen azok felfedezése a 19. és a 20. században történt. Az elmúlt 220 év során a tudomány és a technológia egymással karöltve fejlődött, és tette lehetővé az alapvető természeti állandók felismerését, és értékének egyre pontosabb meghatározását. Most érkezett el az idő, amikor a mérések pontosságának fokozása azért nem lehetséges, mert az SI alaplammennyiségeinek a mértékegységeit nem tudtuk kellő pontossággal. Hétköznapi hasonlattal: ha a magasugrás arról szól, hogy mekkora magasságbeli távolságot tud valaki áthidalni, akkor az igazán pontos méréshez lényeges tudni az elrugaszkodás helye között fennálló magasságkülönbségeket is.

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 hétköznapi életben 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 érzékelni súlya alapján tudunk), „a hőmérő

szerint 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  $1 \text{ lux} = 1 \text{ lm/m}^2$ ) 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: *26e CPM: Résolutions adoptées*. Versailles 13–16 novembre 2018.