

a kísérletet, mert láttuk, hogy a próbatetek alakjától függően jelentkező szabályos hatás mennyire befolyásolhatja a mérés eredményét. A jó hír az, hogy a most ismertett szabályos hiba viszonylag könnyen kézben tartható a próbatetek alakjának megfelelő megválasztásával. Ha csak olyan henger alakú próbatömegeket használunk a kísérletben, amelyek esetében a  $H^2/12 - R^2/4$  értéke állandó, akkor – mint láttuk – ez a szabályos hiba, függetlenül a gravitációs erőter szerkezetétől, nem lép föl.

## Összefoglalás

Az ekvivalenciakísérlet szabályos hibája, ahogy láttuk, abból adódik, hogy a próbatest méretével összevethető távolságon a gravitációs erő megváltozása már nem tekinthető egyenletesnek, így számít a próbatetek alakja is. Eötvösök eredeti ekvivalenciakísérlete anynyira érzékeny volt, hogy már egy ilyen kicsiny, másodrendű gravitációs hatás is megjelenhetett az eredményekben, amire ők akkor nem gondoltak. Az ekvi-

valenciakísérlet megismétlése modern körülmények között – elképzelésünk szerint – segíthet megérteni azokat az okokat, amelyek az Eötvös–Pekár–Fekete-kísérletben felhasznált anyagok kötési energiájától függő szabályos eltéréseihez vezettek, illetve a megismételt kísérlet már mentes lehet a próbatetek alakjától és a gravitációs tér szerkezetétől függő, a jelen cikkben tárgyalt szabályos hibától. Az érdeklődő olvasó további részleteket találhat az [5] cikkben.

## Irodalom

1. Eötvös R., Pekár D., Fekete E.: Beiträge zum Gesetze der Proportionalität von Trägheit und Gravität. *Annalen d. Physik* 373/9(1922) 11–66.
2. Péter G., Deák L., Gróf Gy., Kiss B., Szondy Gy., Tóth Gy., Ván P., Völgyesi L.: Az Eötvös–Pekár–Fekete ekvivalenciaelv-mérések megismétlése. *Fizikai Szemle* 69/4 (2019) 111–116.
3. Király P.: A 100 éves Eötvös–Pekár–Fekete kísérletek és máig tartó hatásuk. *Fizikai Szemle* 57/1 (2007) 1–6.
4. Völgyesi L., Ultman Z.: A nehézségi gradiensek linearitás vizsgálata a Mátyás-barlangban. *Geomatikai Közlemények XIII/2* (2010) 123–128.
5. Tóth Gy.: Explanation of the EPF experiment in terms of gravity gradients. *arXiv* (2018) <https://arxiv.org/abs/1803.04720>

# 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 Szemle*ben [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 százezernél 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 alaplmenntységei 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 alaplmenntységeinek korábbi definiáláshoz szükséges mennyiségek és állandók értékei a hétköznapiakban 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 *alaplmenntységek 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 alaplmenntység mértékegysége, amely más mértékegységre támaszkodik, csak korábban meghatározott (alacsonyabb sorszámú) mértékegységet használ.

Látjuk, hogy az alapegységek és az alaplmenntységek 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 alaplmenntységeinek 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.