

A tudomány hét pillére

2019. május 21-én az MTA székházának Felolvasótermében szervezte meg a Kémiai Tudományok Osztálya az SI mértékegységrendszer megújulásáról szóló, a 191. Közgyűlés rendezvénysorozatához kapcsolódó, angol nyelvű tudományos ülést „IUPAC and the seven stalwarts of science” címmel. Az érdeklődők összesen hét témáról hallgathattak meg rövid beszámolót; az előadók Roberto Marquardt (Université de Strasbourg), Felinger Attila (PTE), Fischer János (Richter Gedeon Nyrt.), Szűcs László (Budapest Főváros Kormányhivatala, Metrológiai és Műszaki Felügyeleti Főosztály), Lente Gábor (PTE), Schiller Róbert (MTA Energiatudományi Kutatóközpont) és Klaus Müller-Dethlefs (University of Manchester) voltak, míg a program megszervezéséről és vezetéséről Császár Attila (ELTE), Lendvay György (MTA TTK) és Szántay Csaba (Richter Gedeon Nyrt.) gondoskodtak. Az SI-rendszerben a fő változás 2019. május 20-tól a kilogramm alapegység definíciójának modernizálása, amely ezentúl nem kötődik egy valóságban létező, megváltoztatható és megsemmisíthető tárgyhoz. Ezzel együtt megváltozott a mól, az amper és a kelvin egységek definíciója is.

A Magyar Kémikusok Lapja ebben a számban két, az ülésen elhangzott előadás alapján készült cikket közöl.

LG

Schiller Róbert

■ MTA Energiatudományi Kutatóközpont

Az új SI-rendszer – a természetes számok ajándéka

Sok helyen megírták, így mindenki, aki a természettudományokban csak valamennyire is járatos, a műszaki ismeretek iránt csak kicsit is fogékony, tudja már, hogy a mérések tudományában 2019. május 20-án új korszak kezdődött. Ezen a napon megváltozott az alapvető mennyiségek definíciója [1]. A Nemzetközi Súly- és Mértékügyi Hivatal (Bureau International des Poids et Mesures: BIPM) bölcsessége azonban megővta a mértékegységeket, definícióik változása nincsen hatással a nagyságukra, azokat változatlanul hagyja: a tavalyi méter vagy kilogramm jövőre is ugyanannyi lesz. A törekvés az volt, hogy a fizikai mennyiségeket meghatározott nagyságú természeti állandók definiálják tárgyban megvalósuló standardok helyett, amilyen például a Pt-Ir ötvözetből készült, Saint-Cloud-ban őrzött kilogramm etalon (volt) [2]. Ilyen természeti állandó például az Avogadro-állandó: ennek értékét ezentúl definíció rögzíti, tehát ha valamikor a ^{12}C -izotóp tömegét újra és pontosabban fogják meghatározni, nem az Avogadro-állandó(!) értéke fog változni, hanem az izotóp tömege.

Hét fizikai mennyiség numerikus értékét rögzítik definíciók. Ezek rendre:

A *Planck-állandó*, h pontosan $6,62607015 \times 10^{-34}$ joule-másodperc ($\text{J} \cdot \text{s}$).

Az *elemi töltés*, e pontosan $1,602176634 \times 10^{-19}$ coulomb (C).

A *Boltzmann-állandó*, k pontosan $1,380649 \times 10^{-23}$ joule per kelvin ($\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$).

Az *Avogadro-állandó*, N_A pontosan $6,02214076 \times 10^{23}$ reciprokmól (mol^{-1}).

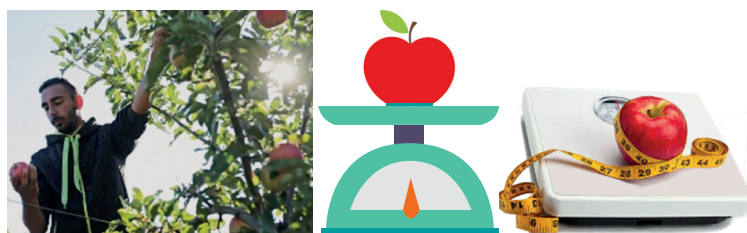
A *fénysebesség*, c pontosan 299792458 méter per másodperc ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$).

Az alapállapotú ^{133}Cs -izotóp hiperfinom átmenetének *frekvenciája*, $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ pontosan 9192631770 hertz (s^{-1}).

A kandela, K_{cd} az olyan fényforrás *fényerőssége* adott irányban, amely 540×10^{12} Hz frekvenciájú monokromatikus fényt bo-

csát ki és sugárerőssége ebben az irányban 1/683 watt per szteradian.

A változás a mérések gyakorlatát kevésbé érinti, a megértést annál inkább [3]. Érdemes talán egy kevésbé elgondolkozni egyik-másik vonatkozásán. Mindannyian tudjuk, hogy micsoda egy alma – fán nő, piros, meg lehet enni. Ha az almát valahogy mennyiségileg jellemezni, kvantifikálni akarjuk, arra sok módunk van. Egyebek mellett például egyesével meg lehet számolni őket, meg lehet mérni mérlegben a tömegüket, mérőszalaggal a kerületüket (1. ábra). Azt kell csak tudnunk, hogy micsoda az alma.



1. ábra. Az alma kvantifikálásának néhány lehetősége

Az elmagyarázhatatlan

Sajnos, a viszonyok nem mindig olyan egyszerűek, mint egy alma. A jelenségek térben és időben játszódnak le. A tér legegyszerűbb jellemzője a távolság, az időé a tartam. Ezeket mérni tudjuk. De mi a tér és mi az idő? A fogalmakat hagyományosan a filozófia, esetleg a lélektan tárgyalja. Egyes tulajdonságokról a fizikai elmélet ad képet. A metrológia tudománya ezekhez azonban nem szólhat hozzá. Mégis, mérnünk kell!

A huszadik század elejéig úgy gondolták, egymástól független



mennyiségekről van szó. A speciális relativitáselmélet megjelenésével azonban nyilvánvalóvá lett, hogy tér és idő szétbogozhatatlan együttesben határozza meg az események koordinátáit. A vákuumbeli fénysebesség a kapcsolat tartam és távolság között.

Bay Zoltán javaslatára a nemzetközi mérésügyi szervezet, a BIPM, 1983-ban a távolságot azzal az időtartammal definiálta, amennyi alatt a fény vákuumban elér a szakasz egyik végétől a másikig:

$$\text{távolság} = \text{fénysebesség} \times \text{időtartam}. \quad (1)$$

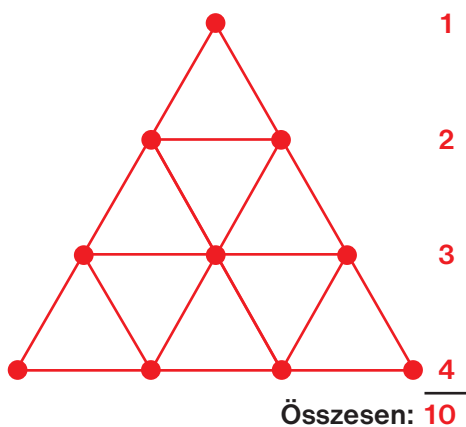
Ez a definíció akkor értelmes csak, ha tudjuk, hogy a fénysebesség nem függ a fény hullámhosszától és ugyanakkora az egész, általunk belátható univerzumban. Bay Zoltán kritikai elemzései bebizonyították, hogy mindkét követelmény teljesül.

A jobb oldalon két mennyiség áll, mindkettőt egy-egy rögzített állandó definiálja. Más nem is szerepel a távolság definíciójában – ebben a tekintetben ez egyedül áll az alapvető mennyiségek között. A fénysebesség valódi állandója a természetnek. Az időtartam meghatározásával azonban bajban vagyunk.

Ezt a bajt már Szent Ágoston [4] is felismerte: „Mi az idő? Ha senki nem kérdezi tőlem, tudom. Ha el akarom magyarázni valakinek, aki kérdezi, nem tudom.” Sokkal okosabbak talán 1600 év alatt se lettünk. De hát: mérnünk kell! Így jobb híján önkényesen kiválasztottak egy jól reprodukálható időtartamot, egy spektrumvonal frekvenciájának a reciprokát, és ezt használjuk az időtartam meghatározásában mint rögzített nagyságú állandót. A természetben semmi nincsen, ami éppen erre a választásra kényesített volna bennünket.

A megszámlálhatók

A legegyszerűbb számtani művelet a számlálás. Az Eukleidész előtti korban a püthagoreus matematika a mennyiségeket is, a távolságokat is kavicsok számával fejezte ki. Például a tízes számot, a püthagoreusok szent számát, a *tetraktisz* nevű elrendezéssel adták meg (2. ábra) [5, 6].



2. ábra. Tetraktisz

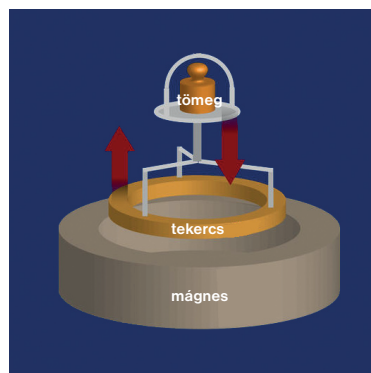
A számlálás tudománya ennél persze ősibb korokból származik. Az egyiptomi Halottak Könyve már ír arról, hogy a halott király lelke csak úgy juthat át egy alvilági vízfolyáson, ha meg tudja számlálni az ujjait. Mert mit szólna az isten a túlparton, mondja a révész, ha tudatlan embert akarnék bevinni az ő birodalmába [7]. A király, szerencséjére, megfelelt ezen a túlvilági intelligenciateszten.

A természetes számok később se veszítették el a rangjukat. „Az egész számokat a Jóisten csinálta, az összes többi az ember munkája” – írta Leopold Kronecker [8] a tizenkilencedik század

közepén. Távolságokat mi ugyan nem kavicsok számával mérünk, mivel a hosszúság folytonosan változó mennyiség, akár csak az idő. De ahogy a huszadik század elejére kétségtelenné vált az anyag atomos szerkezete, bebizonyosodott az elemi töltés oszthatatlansága és világossá vált az energiakvantum létezése, úgy lett nyilvánvaló, hogy a természetes számok alapvető szerepet játszanak a természettudományokban, a számlálás pedig a mennyiségi leírás fontos eszköze lett.

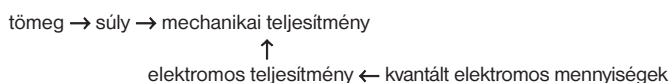
Az anyag mennyiségét mindannyiunk számára világos módon az individuális részecskék számával fejezzük ki. Ezért tartjuk természetesnek, hogy az Avogadro-„számból” definíciószerűen rögzített állandó lett. Hasonló módon magától értetődő, hogy az elektromos töltést az elemi töltések száma, az áramot ennek időegységre eső változása méri (az áram korábbi definíciójában szereplő mágneses tér helyett). Ezt a számot rögzíti az elemi töltés nagyságának definíciója: $(1/e)$ számú elemi töltés = 1 coulomb.

A tömeg egységéhez kétféle út vezethet. Az egyik adott tömegű atomi részek, például protonok összeszámlálása lehetne; a tömeg egység ekkor meghatározott számú proton lenne. Nem ezt választották. Ehelyett olyan mechanikai és elektromos elrendezést valósítottak meg, amelynek segítségével a tömeg egységét a Planck-állandóra lehet visszavezetni. Erre a célra a Kibble-mérleget használják [9,10] (3. ábra).



3. ábra. Kibble-mérleg: tömeg, tekercs, mágnes

Az eljárás alap gondolatát az alábbi vázlat segítségével lehet áttekinteni.



Az m tömeg a Föld gravitációs erőterében $F_z = mg$ nagyságú erőt fejt ki, itt g a mérleg helyén fellépő nehézségi gyorsulás. A mérleg karján, a tányérhoz mereven rögzítve egy N menetszámú tekercs is lóg, amelyen I erősségű áram folyik át. Ha a tekercsre B_z erősségű, függőleges (z irányú, felfelé mutató) mágneses tér hat, úgy egy $F_e = INB_z$ nagyságú erő lép fel. Konstans B_z mellett, I változtatásával, F_z és F_e egyenlővé tehető, a mágneses erő egyensúlyt tart a nehézségi erővel (Φ a mágneses fluxus a tekercs teljes felületén):

$$mg = INB_z = -IN \frac{\partial \Phi}{\partial z}. \quad (2)$$

Ebben a lépésben az áram átjárta vezető mágneses terét használja ki a mérleg. A számítás alapja a *Biot-Savart-törvény*.

A mérést ki kell egészíteni a tekercs teljes felületén uralkodó mágneses fluxus meghatározásával. Ezt az *elektromágneses indukció* segítségével lehet megtenni. Ha az előzőekben leírt mérlegről eltávolítják a mérendő tömeget, és a tányért a tekercssel együtt konstans $v_z = dz/dt$ sebességgel mozgatják, úgy a *Faraday-törvény* értelmében a tekercsben U nagyságú feszültség lép fel:



$$U = -N \frac{\partial \phi}{\partial t} = -N \frac{\partial \phi}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial t} = -N \frac{\partial \phi}{\partial z} v_z. \quad (3)$$

A fenti két egyenlet kombinációjából mechanikai teljesítmény és elektromos teljesítmény jellegű mennyiségek egyenlőségéhez jutunk:

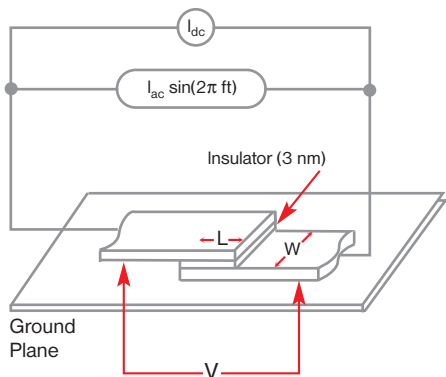
$$UI = mgv_z. \quad (4)$$

Se U és I , se m és v_z nem összetartozó mennyiségek, különböző mérésekből származnak, egymástól függetlenül kell őket meghatározni.

Az előzőekben leírtak a klasszikus kontinuum-elektrodinamika, a Maxwell-egyenletek fogalomkörén belül mozognak. Feszültség és ellenállás nagyon pontos meghatározását azonban elemi mikrofizikai mennyiségekre lehet visszavezetni – feszültséget a Josephson-effektus, ellenállást a kvantum Hall-effektus segítségével mérhetünk. Mindkét jelenség alacsony hőmérsékletű szupravezetőkben figyelhető meg [11]. Közös jellemzőjük, hogy az eszközök, amelyekben a folyamatok végbemennek, legalább egyik dimenziójukban atomi méretűek. A töltéshordozók tehát a térnek csak kis részeiben mozoghatnak szabadon, ez a korlátozás pedig előhívja mozgásuk kvantumos jellegét. (Akár a dobozba zárt részecske vagy az atomtörzshöz kötött elektron esetén.)

A Josephson-effektus az alagútjelenségen alapszik. Két szupravezetőt egy vékony dielektrikumréteggel választ el egymástól. A szupravezetőben mozgó töltéshordozók (ezek nem elektronok, hanem ún. Cooper-párok, ennek azonban most nincs jelentősége) alagúteffekttal jutnak át a dielektrikumrétegen. Ha az eszközön f_J frekvenciájú áramot vezetünk át, U_J nagyságú feszültség lép fel a szupravezetők között:

$$U_J = f_J \frac{h}{2e}. \quad (5)$$

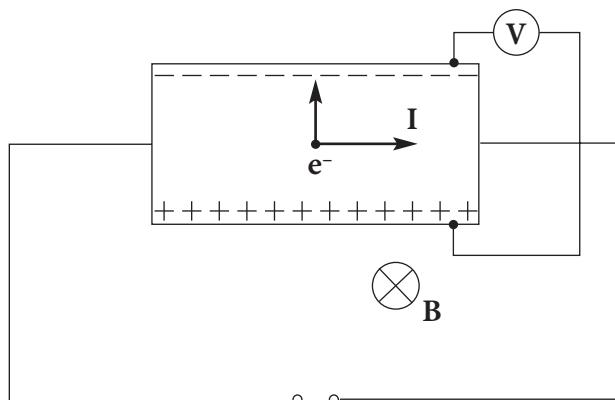


4. ábra. Josephson-feszültségstandard egy eleme

Mivel ez a feszültség az alkalmazott mikrohullámú frekvenciák mellett csak néhány 10 μ V nagyságú, ezért valós mérésekhez n számú elemet kapcsolnak sorba (4. ábra), így a feszültség:

$$U_j = nU_J = nf_J \frac{h}{2e}. \quad (6)$$

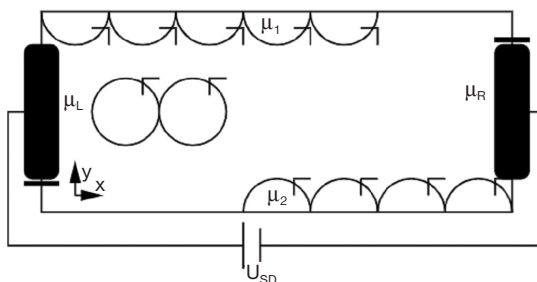
A kvantum Hall-effektus is atomi méretű térrészben lép fel [12]. A klasszikus, makroszkópos viszonyok közt megfigyelhető jelenség könnyen érthető. Ha áram átjárta vezetőlapkát a lap síkjára merőleges irányú mágneses térbe helyezünk, úgy a lapkán az áram irányára merőlegesen elektromos feszültség ébred. Ez az idén épp 130 éve ismert, klasszikus Hall-effektus. Mérését az 5. ábra vázolja: az áram a rajzon balról jobbra folyik, a mágneses tér iránya merőleges a rajz síkjára, a Hall-feszültség az alsó és



5. ábra. A Hall-effektus mérésének vázlata

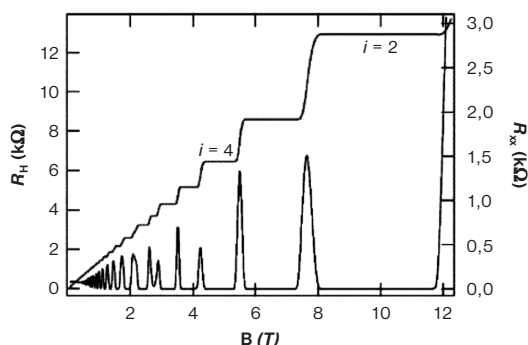
felső lapszélék között, tehát mind az áram, mind a mágneses tér irányára merőlegesen mérhető. Hall-ellenállásnak a Hall-feszültség és az áram hányadosát nevezik. Ez növekvő mágneses térrel folytonosan és egyenletesen növekszik. A jelenség oka az, hogy a töltéshordozók a mágneses tér hatására eltérnek háborítatlan pályájuktól, és az áram eredeti irányára is merőlegesen mozdulnak el.

Ha a töltéshordozók mozgását úgy korlátozzuk, hogy csak síkban (tehát atomi vastagságú rétegben) tudnak haladni, úgy mozgásuk kvantált lesz, a 6. ábra szerinti pályák mentén tudnak csak haladni.



6. ábra. Töltéshordozók pályája kvantum Hall-effektusban

A kvantálás pedig a Hall-effektus mérésében úgy mutatkozik meg, hogy az R_H Hall-ellenállás a mágneses tér növelésével nem folytonosan, hanem lépcsőzetesen változik (7. ábra).



7. ábra. Kvantum Hall-ellenállás és longitudinális ellenállás a mágneses tér függvényében

A kvantum Hall-ellenállás nagyságát két természeti állandó mellett csak egy pozitív egész szám határozza meg:

$$R_H = \frac{1}{p} \frac{h}{e^2} \quad p = 2,3,4 \dots \quad (7)$$



Összefoglalva mindazt, amit a (2)–(7) egyenletek tartalmaznak, tömeg és Planck-állandó kapcsolatához jutunk:

$$m = n_1 n_2 p f_{j1} f_{j2} \frac{1}{v_z g} h. \quad (8)$$

Két feszültségmérést kell végezni egymás után, először a tömeg kiegyensúlyozására, másodsor a mágneses tér meghatározására, ezért szerepel két frekvencia és két n az egyenletben. Eltekintve az igen pontosan meghatározható v_z és g mennyiségektől, a tömeget a Planck-állandó egész számú többszöröseként fejeztük ki.

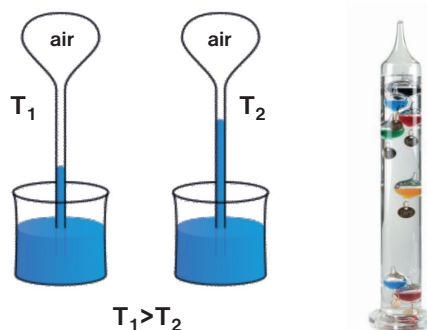
Az ember formájúak

A fényintenzitás és a hőmérséklet fogalmai a legközvetlenebbül kapcsolódnak érzékszervi tapasztalatainkhoz, a világossághoz és a meleghez. Ezt a származásukat mértékegységeik definíciói se tagadják meg.

A fény mérése a fényforrás által kibocsátott, a megvilágított tárgyról visszavert vagy a benne elnyelt elektromágnes energia mennyiségének a meghatározását jelenti. Ennyiben hasonlít a radiometriához, amely a sugárzás teljesítményét méri. Sugárzáson itt valamennyi frekvenciájú sugárzást kell érteni, beleértve a látható fényt is. A fotometria egységei azonban tekintettel vannak az emberi szem színek szerint eltérő érzékenységre – a radiometria ilyen megkötést nem ismer [13]. A fotometria alapvető egysége, a fényerősség, az egységnyi térszögben, meghatározott irányban kisugárzott fizikai teljesítmény, megszorozva az átlagos emberi szem relatív érzékenységgel. Így zérustól eltérő értéke csak a szemünk számára látható hullámhossztartományban van. Egysége a kandela, amely a szem legérzékenyebb tartományára, a zöld színre, 555 nm hullámhosszú fényre vonatkozik.

A természettudományos gondolkodás számára talán furcsa, hogy egy emberi tényező is szerepel a definícióban. Goethe a tizenkilencedik század elején írta *Szintanát* [14], amely voltaképpen nem más, mint terjedelmes vitairat Newton optikája ellen. A newtoni spektroszkópia szabatos méréseivel szemben ő a szubjektív benyomásokat, a színérzékelés élményeit sorakoztatta fel. Elutasította a fény „megkínzását”, hogy réseken, nyílásokon, lencséken, prizmákon bocsátják át, így kényszerítve arra, hogy feltárja a természetét, amelyet pedig Goethe szerint ezek a kegyetlen eljárások meghamisítanak, megmásítanak. A költő elutasítja a színek fizikai elméletét: „Newton tévedése abban áll, hogy [...] jobban bízik a matematikában, mint a saját szemében.” Ő, azt hiszem, örülne a kandela definíciójának.

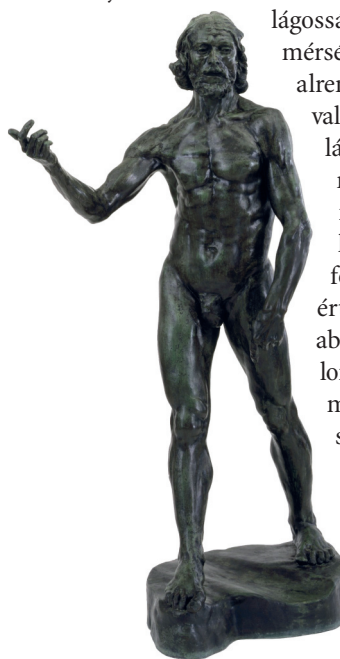
A szubjektív hőérzetet objektív módon a hőmérséklet fejezi ki. Ehhez olyan anyagi tulajdonságot kell találni, amelynek nagysága változik a változó hőérzetekkel. Ebből számos-számtalan van, nagyon sokféle elven működő hőmérőt ismerünk. Voltaképpen bármelyik alkalmas lehetne a hőmérséklet definíciójára. Történetileg elsőként két lehetőség merült fel, mindkettő Galilei nevéhez fűződik. Az egyik a gázhőmérő: bármely, közelítőleg ideálisan viselkedő gáz térfogatát, valamely rögzített nyomáson, arányosnak tekintjük a hőmérséklettel. A másik a folyadéksűrűség-hőmérő: egy folyadék változó sűrűsége méri a hőmérsékletet (8. ábra). Mint tudjuk, a változó folyadéksűrűséget indikáló eszköz íróasztaldísz lett; a hőmérséklet mérését gáz térfogatváltozására, pontosabban az ideálisgáz-törvényre alapozták. Meg is jelenik ezért, a kezdők nem csekély meghökkenésére, a fizika és a kémia legkülönfélébb ágaiban az R gázállandó, vagy annak N_A hányada, a k Boltzmann-állandó. Első rátekintésre nem könnyű meg-



8. ábra. Gázhőmérő és folyadéksűrűség-hőmérő

érteni, hogy egy másodfajú elektród potenciáljának vagy a Brown-mozgásnak mi köze van az ideális gázhoz.

Hő és hőmérséklet viszonyának tisztázása, a hővezetés törvényének felismerése, a hóanyag eszméjének kialakulása szinte természetessé tette, hogy a nagyobb gáztérfogat magasabb hőmérsékletet jelent. A statisztikus mechanika fejlődése során aztán világossá vált, hogy az így definiált hőmérséklet arányos egy részecske- vagy



9. ábra. August Rodin: Keresztelő Szent János

alrendszer-sokaság átlagos energiájával. Az energia és a hőmérséklet skálái között tehát egy arányossági tényező teremt kapcsolatot. Ez a tényező a Boltzmann-állandó. Értékét mostantól definíció rögzíti. Ez fontos dolog, hiszen így válik egyértelművé a hőmérséklet értéke, az abszolút hőmérsékleti skála. Tartalom dolgában azonban nem több ez, mint egy alapvető fizikai mennyiség, az energia kifejezése egy vele arányos másik, önkényes emberi választáson alapuló mennyiség segítségével.

Nem lehet kétségünk abban, hogy a metrológia tudomány 2019. május 20-án nagy lépést tett mind a fogalmak tisztázásában, mind a mennyiségek standardizálásában. Rodin határozott léptű, mindkét talpán biztosan álló Szent Jánosára gondolhatunk (9. ábra).

De ez a szent se áll meg, lép tovább. Ez a tudományág is ezt teszi majd.

IRODALOM

- [1] <https://www.bipm.org/en/measurement-units/base-units.html>
- [2] Simonyi M., Természet Világa (2019) 150, 194–198.
- [3] Trócsányi Z., Fizikai Szemle (2019) 69, 158–160.
- [4] Aurelius Augustinus, Vallomások. Gondolat, Budapest, 1987.
- [5] Szabó Árpád, A görög matematika kialakulása, Magvető, Budapest, 1978.
- [6] <http://jwilson.coe.edu/EMAT6680Su11/Kitchings/CK6690/Figurate%20Numbers.html>
- [7] Neugebauer, O., Egzakt tudományok az ókorban. Gondolat, Budapest, 1984.
- [8] https://gdz.sub.uni-goettingen.de/download/pdf/PPN235181684_0043/LOG_0007.pdf
- [9] <https://www.nist.gov/si-redefinition/kilogram-kibble-balance>
- [10] Schlaminger, S., Haddad, D., Comptes Rendus Physique (2018) Available online 25 March (2019) <https://doi.org/10.1016/j.crhy.2018.11.006>
- [11] Elliott, S., The Physics and Chemistry of Solids. Wiley, Chichester 1998.
- [12] Jeckelmann, B., Jeannere, B. Séminaire Poincaré (2004) 2, 39–51.
- [13] [https://en.wikipedia.org/wiki/Photometry_\(optics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Photometry_(optics))
- [14] Goethe, J. W., Farbenlehre, Goethes Werke in zwölf Bänden, Band 12. Aufbau Verlag, Berlin und Weimar, 1968.