

## A tömeg egysége és etalonja

*A cikk a tömeg egységének és etalonjának kialakulását követi nyomon. Bemutatja az egység megvalósításához alkalmazható mérés technikákat és az etalon gyakorlati kivitelezésének fejlődését a 18. század végétől napjainkig. A megírásához felhasznált forrásmunkák: a Nemzetközi Súly- és Mértékügyi Hivatal „A Nemzetközi Mértékegység-rendszer (SI)” című, angol nyelvű brosúrájának 2006. évi, 8. kiadása; a PTB etalonokról szóló 1983. évi kiadványa; Ian M Mills, Peter J Mohr, Terry J Quinn, Barry N Taylor és Edwin R Williams „Redefinition of the kilogram, ampere, kelvin and mole: a proposed approach to implementing CIPM recommendation 1 (CI-2005) Metrologia 43 (2006) 227–246 című tanulmánya, valamint Ian Mills-nek a Chemistry International-ban 2005-ben megjelent, An Update on the Kilogram című cikke.*

### Bevezetés

A fizikai mennyiségek meghatározása – és így a tömegé is – a mérésük módszerére vonatkozó utasítással történhet. Magának a fizikai mennyiségnek a test, anyag vagy jelenség alapvető jellemzőjeként (attribútumaként) való meghatározása az esetek többségében nem lehetséges. Nem adunk kielégítő választ a „mi a tömeg?” kérdésre azzal, ha azt mondjuk: a (mozgó vagy dinamikus) tömeg a ráható erő és a gyorsulás hányadosa, mert akkor máris előtökölódik a következő két kérdés: „mi az erő?” vagy „mi a gyorsulás?”. Ha mégis megkíséreljük a tömeg fogalmát megvilágítani, akkor azt mondhatjuk, hogy a tömeg egy test anyagának az a jellemzője, amely a mozgási állapotának megváltoztatásával szemben tanúsított tehetetlenségi hatásban, vagy a más testekre gyakorolt vonzásban nyilvánul meg. Itt említjük meg Eötvös Loránd (1848 – 1919) nevét, aki ingakísérlettel bizonyította be a tehetetlen tömeg és a gravitációs (súlyos) tömeg azonosságát.  $5 \times 10^{-6}$  pontosságú mérésére az általános relativitás elmélet megalkotásakor Einstein rá is hivatkozott.

A tömeg egysége a kilogramm. A Nemzetközi Mértékegység-rendszernek, az SI-nek ez az alapegysége azzal a különleges tulajdonsággal rendelkezik, hogy – az alapegységek között egyedüli módon – az elnevezése a *kilo* prefixumot is magába foglalja. Ennek egyik lehetséges oka az, hogy az egység elnevezésének másik tagja, a gramm, a mindennapi gyakorlat számára túlságosan kicsinek minősíthető<sup>1</sup>. Egy másik feltételezhető ok, hogy a méter, kilogramm, másodperc, amper alapegységekre épülő MKSA rendszerből kifejlesztett SI-t nem akarták még azzal is bonyolítani, hogy egy CGS egységet tegyenek meg alapegységnek.

### Az 1899. évi kilogramm-definíció és a meghatározás finomítása

Ugyancsak rendkívüli körülmény, hogy a mai napig a tömeg egységének meghatározása és etalonnal<sup>2</sup> való megvalósítása ugyanazzal a *mesterséges mértékkel* történik. Az 1899. évi, 1. Általános Súly-és Mértékügyi Értekezlet (francia nyelvű rövidítése: CGPM) határozatát szó szerint idézve: „A tömeg egysége, a kilogramm, a Nemzetközi Etalon tömegeként van

<sup>1</sup> A ma már csak korlátozottan használható CGS egységrendszer alapegységei a centiméter, a gramm és a másodperc voltak. Ennek a rendszernek a „fekete báránya” a centiméter, mert annak az elnevezésében a *centi* prefixum jelenik meg.

<sup>2</sup> Az etalon a VIM 3. kiadásának tervezetében adott meghatározása szerint: mérték, mérőműszer, anyagminta vagy mérőrendszer, melynek az a rendeltetése, hogy egy mennyiség egységét illetve egy vagy több ismert értékét definiálja, megvalósítsa, fenntartsa vagy reprodukálja és referenciaként szolgáljon.

meghatározva”. Ebben az esetben tehát nem lehet abban az értelemben beszélni az egység definíciójának a „megvalósításáról”, mint a többi alapegység esetén.<sup>3</sup>

A Nemzetközi Etalon másik elnevezése: a „Nemzetközi Kilogramm Prototípus”. A prototípus felületén lejátszódó, még nem eléggé ismert folyamatok miatt nem lehet a megvalósítást  $1 \times 10^{-8}$ -nál pontosabbnak (kisebb relatív bizonytalanságúnak) tekinteni. Régóta tudott, hogy a prototípus tömege időben növekszik a környezeti feltételek változása és a mérték felületének minősége miatt. Ez a tömegnövekedés átlagosan évi 1  $\mu\text{g}$ -ot tesz ki. A többlet-tömeg a Nemzetközi Súly-és Mértékügyi Hivatalban (francia elnevezésének rövidítése: BIPM) kidolgozott tisztítási és mosási eljárással jórészt eltávolítható. A tapasztalatok szerint a tisztítási eljárás után a tömegnövekedés mértéke az első 3-4 hónapban 1  $\mu\text{g}/\text{hónap}$ , majd lecsökken 1  $\mu\text{g}/\text{év}$ -re.

Létrehozása óta a prototípust három ízben alkalmazták a nemzeti tömegetalonok kalibrálására. A harmadik kalibrálás, mintegy 40 nemzeti etalon részvételével, 1993-ban fejeződött be. Az összehasonlítások nem magával a prototípussal, hanem a prototípus másolataival történtek. A nemzeti etalonok kalibrálásának bizonytalansága 2-3  $\mu\text{g}$  volt, amit nem annyira a kalibrálási eljárás, mint inkább a prototípus instabilitása okozott.

### A CGPM 1901. évi határozata

A 3. CGPM, 1901-ben határozatot hozott a tömeg egységéről, a súly meghatározásáról és a nehézségi gyorsulás  $g_n$  elfogadott (konvencionális) értékéről. A határozatot szó szerint idézzük:

„Figyelembe véve a Nemzetközi Súly- és Mértékügyi Bizottság (francia elnevezésének rövidítése: CIPM) döntését, mely szerint a tömeg egysége a kilogramm; figyelembe véve a Méterrendszer prototípusainak jóváhagyásába foglalt döntést, amelyet 1989 szeptember 16-án az Általános Súly és Mértékügyi Értekezlet egyhangúlag elfogadott; figyelembe véve azt, hogy szükséges megszüntetni a félreérthetőséget a *súly* szó értelmezésének jelenlegi gyakorlatában, amit hol *tömegként*, hol *mechanikai erőként* használnak, az Értekezlet kinyilvánítja:

1. A kilogramm a tömeg egysége, amely egyenlő a nemzetközi prototípus tömegével.
2. A „súly” szó „erő” jellegű mennyiséget jelent: Egy test súlya a tömegének és a nehézségi gyorsulásnak a szorzata; Egy test standard (szabványos) súlya a tömegének és a standard (szabványos) nehézségi gyorsulásnak a szorzata.
3. A standard nehézségi gyorsulásnak a Súlyok és Mértékek Szolgálata (Service of Weights and Measures) által elfogadott és néhány ország törvényeiben már megtalálható értéke:  $980,665 \text{ cm/s}^2$ .”

A tömeg nemzetközi prototípusa egy irídium és platina ötvözetéből készült, 39 mm átmérőjű és ugyancsak 39 mm magasságú henger, amelyben a platina tömeghányada 90%, az irídiumé 10%, és amelyet Párizs Sèvres nevű külvárosában, a BIPM-ben őriznek.

### A Nemzetközi Kilogramm Prototípussal kapcsolatos problémák

A nemzetközi prototípussal elvégzett összehasonlító mérésekből az a tapasztalat volt levonható, hogy mind a prototípus, mind a nemzeti etalonok tömege időben változik.

Mivel a Pt-Ir ötvözet sűrűsége  $23,5 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , a rozsdamentes acélé pedig  $8 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , ezért a különböző anyagból készült tömegetalonok összehasonlításakor felhajtóerő-korrekciót kell

---

<sup>3</sup> Vagy nagyon is lehet, és csak itt lehet megvalósításról (megtestesítésről) beszélni, mert ennek a mértéknek a tömege maga a kilogramm.

alkalmazni. Mérlegeléskor ugyanis a „súlyok” úsznak a levegőben, és a térfogatuknak megfelelő levegő kiszorításából eredő súlycsökkenés az acélból készült tömegetalonoknál nagyobb, mint a Pt-Ir ötvözetből készülteknél. Elsősorban a levegő sűrűség-mérésének bizonytalansága miatt, a rozsdamentes acélból készült másolatok bizonytalansága nem csökkenthető  $1 \times 10^{-8}$  alá. A prototípusról történő leszármaztatás komoly hátránya, hogy magának a prototípusnak az időbeli megváltozását nem lehet pontosan megállapítani.

A kilogramm meghatározása az SI tökéletesítésének középponti problémája. Bár a CGPM által 1889-ben történt elfogadása óta a nemzetközi prototípus jól szolgált tömegegységként, jelentős hátránya, hogy nem kapcsolódik természeti állandóhoz. Az utóbbi negyedszázadban ezért állandóan napirenden tartották annak a lehetőségét, hogy a kilogrammot, valamilyen atom tömegét vagy más fizikai állandót használva, igazi természeti állandó segítségével határozzák meg

### **A fizikai állandókkal való kapcsolat általános érvényű jelentősége**

A fizikai állandók vagy más néven természeti állandók (angolul: fundamental physical constants) az anyag és a sugárzás atomisztikus alapon történő leírására alkalmas mennyiségek, amelyek nagy pontossággal ismertek és/vagy mérhetők. (Példák: a fénysebesség ( $c$ ), a Planck-állandó ( $h$ ), az elektron tömege és a proton tömege ( $m_e$ ,  $m_p$ ), az elemi töltés ( $e$ ), az Avogadro-állandó ( $N_A$ ), vagy a Boltzmann-állandó ( $k$ )).

Az igény, hogy a kilogramm jelenlegi, mesterséges mértéken alapuló meghatározását fizikai állandóra alapozott meghatározással cseréljék fel, már a 21. CGPM 1999. évi ülésén hozott 7. Határozatban megfogalmazódott. Ebben a határozatban az Értekezlet „javasolja, hogy a nemzeti laboratóriumok folytassák erőfeszítéseiket azoknak a kísérleteknek a tökéletesítésére, amelyek a tömeg meghatározását fizikai állandókkal vagy atomi állandókkal kapcsolják össze, szem előtt tartva a kilogramm jövőbeli új meghatározását”. A határozat összhangban van a CGPM legfontosabb feladatainak egyikével, ami a Nemzetközi Mértékegység-rendszer időről-időre történő módosítása, annak a biztosítására, hogy az SI tükrözze a tudományban és a technológiában elért haladás legújabb eredményeit.

Az alapegységek gyakorlati megvalósításával szemben támasztott legfontosabb követelmények a következők: Elérhetőség bárhol és bármikor a legjobb gyakorlati mérések megkövetelte pontossággal. Amennyire a korszerű tudományos ismeretek elsajátításának megkívánt szintje megengedi, az alapegységek meghatározásai legyenek mindenki számára megérthetők. Végül, ha egy meghatározás ugyanannak az egységnek a korábbi meghatározása helyébe lép, akkor a folytonosságot meg kell őrizni. Az új meghatározás legyen a korábbi meghatározással összhangban azon a bizonytalanságon belül, amellyel a korábbi meghatározás megvalósítható.

A kilogramm lehetséges újra-meghatározásának vitájára a CIPM 93. ülésén került sor, 2004 októberében. A vitát T. J. Quinnnek a CIPM-hez eljuttatott feljegyzése váltotta ki. A vita eredményeként a CIPM felkérte a Mértékegységek Tanácsadó Bizottságát [Consultative Committee for Units (CCU)], hogy tanulmányozza a kilogramm fizikai állandókra alapozott meghatározásának lehetőségét, és a tanulmányozás eredményét terjessze a CIPM 2005. októberi, 94. ülése elé. Olyan javaslat született, amelyben az [1] cikk szerzői javasolták a kilogramm újra-meghatározását a Planck-állandó vagy az Avogadro-állandó felhasználásával. A javaslat megfogalmazásakor még nem tudták pontosan eldönteni, hogy a kilogramm új meghatározását a  $h$  Planck-állandó értékéhez vagy az  $N_A$  Avogadro-állandó értékéhez

kapcsolják-e. Az Avogadro-állandót rögzítő meghatározás a fogalmi egyszerűség előnyével járna, mivel a meghatározás egyszerűen megszővegezhető úgy, hogy a kilogramm meghatározott számú szén 12 atom tömege. Később azonban a szerzők egyértelműen azt támogatták, hogy a kilogramm meghatározása a Planck-állandó értékét rögzítse. [2]

A szerzők elemezték az utóbbi változat előnyeit. Érvelésük szerint, ha a kilogrammot úgy határozzák meg, hogy  $h$ -t rögzítse, az ampert pedig úgy, hogy az  $e$  elemi töltés értékét rögzítse, akkor mind a  $h$ , mind az  $e$  pontosan meghatározott értékű lesz. Következésképpen mind a  $K_J = 2e/h$  Josephson-állandó, mind pedig az  $R_K = h/e^2$  Klitzing-állandó is pontosan meghatározott értékű lehet. Ez oda vezethet, hogy egyszerűsödnek, és pontosabbakká válnak azok az elektromos mérések, amelyek a Josephson-effektuson és a Kvantum-Hall-effektuson alapulnak. További előny, hogy megnyílik a lehetőség a mól-nak az  $N_A$  Avogadro-állandót rögzítő meghatározására. Végül, a szerzők úgy vélik, hogy a fizika alapjai tekintetében a Planck-állandó fontosabb szerepet játszik, mint az Avogadro-állandó.

### **A kilogramm fizikai állandóra alapozott lehetséges meghatározása**

A lehetséges új kilogramm definíció tehát a  $h$  Planck-állandó értékét rögzíti: *A kilogramm egy test olyan nyugalmi tömege, amellyel a  $h$  Planck-állandó pontosan  $6\,626\,069\,311 \times 10^{-34}$  joule-szekundum.*

Idézzük fel, hogy a Planck-állandó ( $h$ ) az elemi hatáskvantum, (egysége: J·s).

Ezt a javaslatot mindenképp előtt értelmezni kell. A javaslat ugyanis nem mond mást, mint azt, *hogy az egység meghatározása rögzítse a fizikai állandó értékét.* A gondolat nagyon figyelemre méltó, hiszen ezzel megoldódni látszik a méter definíciójával kapcsolatos „ördögi kör” problémája, nevezetesen az, hogy az egység fizikai állandóra (a vákuumbeli fénysebességre) alapozott meghatározásának pontosságát a fizikai állandó értékének nem kellően pontos ismerete korlátozza. Világos, hogy ez a javaslat - elfogadása esetén – valóra váltja azt a már Maxwell által megfogalmazott óhajt, hogy az egységeket megvalósító etalonokat a „természet invariánsaira”, azaz fizikai állandókra alapozzák.

Első látásra nem nyilvánvaló, hogyan határozza meg a kilogramm értékét a Planck-állandó értékének rögzítése. A meghatározásnak ez a módja azért lehetséges, mert  $h = 6,626 \dots \text{J}\cdot\text{s} = 6,626 \dots \text{kg}\, \text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ , és mivel a méter és a másodperc már fizikai állandókkal van definiálva, egyszersmind a kilogramm értéke is rögzítve van, ha a  $h$  számértékét ebben a kifejezésben már rögzítették.

### **Explicit-állandó meghatározás**

A definícióra vonatkozó, előbb idézett javaslat elnevezése a [2] szakirodalomban: *explicit-állandó meghatározás.* Ezen az egység olyan meghatározását kell érteni, amely nemcsak rögzíti a mennyiséghez kapcsolt fizikai állandó értékét, hanem – úgymond – a fizikai állandó ismertnek elfogadott értékére van kihegyezve. A kilogramm egység legyen olyan (legyen a tömege akkora), hogy ennek az egységnek az elfogadása vezessen a Planck-állandó ismert és elfogadott értékére.

Az explicit-állandó meghatározás tehát egyszerűen megállapítja; az egység meghatározása úgy történik, hogy a fizikai állandónak egy megadott értéket tulajdonítanak. Az explicit-állandó meghatározás minden SI-alapegységre alkalmazható a következő általános formában:

„A [az alapegység neve] a [az alapmennyiség neve] egysége, olyan, hogy azzal a [a fizikai állandó neve] értéke pontosan [a fizikai állandó értéke]”

Ha például a méter jelenlegi meghatározását, amely ezt az egységet a  $c = 299\,792\,458$  méter per másodperc vákuumbeli fénysebesség pontos értékével kapcsolja össze, ennek az általános formának megfelelően íránk át, akkor a meghatározás így hangzana: A méter, a hosszúság egysége olyan, hogy *azzal* a vákuumbeli fénysebesség pontosan 299 792 458 méter per másodperc.

A kilogrammot illetően, megjegyezve, hogy a joule, J, egyszerűen egy sajátos név és jelölés az  $\text{m}^2 \text{kg s}^{-2}$  számára, az explicit-állandó meghatározás kimondja, hogy

$$h = 6,626\,069\,3 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \text{kg s}^{-2} \text{ s},$$

amiből következik, hogy

$$1 \text{ kg} = (h\text{m}^{-2} \text{ s}) / (6,626\,069\,3 \times 10^{-34}).$$

Így egy test tömege a laboratóriumban a  $h$ -val kapcsolható össze,  $m$  és  $s$  pedig ugyancsak megvalósítható a laboratóriumban. A  $6,626\,069\,3 \times 10^{-34}$  egy puszta szám, ezért a pontos értéket elfogadva a  $h$ -ra, a kilogramm teljes mértékben meghatározható, és megvalósítható a gyakorlati felhasználás számára. Az explicit-állandó meghatározásnak ezt a lehetőségét a wattmérleges kísérlet biztosítja.

### A wattmérleges kísérlet

A wattmérleges kísérletben a mért súlyt mágneses térben felfüggesztett, áramtól átjárt tekercsben keletkező elektromos erővel egyenlítik ki. Az elektromos méréseket a Josephson-effektus és a Kvantum-Hall-effektus felhasználásával végzik. Idézzük fel, hogy a Josephson-effektus a  $V$  feszültséget a frekvenciával kapcsolja össze a

$$V = hf/2e$$

összefüggésnek megfelelően, ahol  $V$  a feszültség (vagy elektromos potenciál),  $h$  a Planck-állandó,  $e$  az elemi töltés és  $f$  a frekvencia.

A Kvantum-Hall-effektus a térvezérlésű fémoxid tranzisztoron (MOSFET-en) lép fel, ha azt alacsony hőmérsékleten erős mágneses térbe helyezik. Az  $U_H$  Hall-feszültség karakterisztikája lépcsős szerkezetű, és a következő összefüggéssel fejezhető ki:

$$U_H = hI/ie^2 \quad (i = 1, 2, 3 \dots)$$

ahol  $h$  a Planck-állandó,  $e$  az elemi töltés és  $I$  az áramerősség. A Hall-feszültség és az áramerősség hányadosa az  $R_H$  Hall-ellenállás:

$$R_H = h/ie^2 \quad (i=1,2,3 \dots)$$

Az elektromos mennyiségek egységeinek, az ampernek, a voltnek és az ohmnak az SI-ben adott definícióik szerinti megvalósítása viszonylag jelentős relatív mérési bizonytalanságú ( $4 \times 10^{-7}$ ) és időigényes eljárás. A CIPM ezért 1988-ben azt javasolta, hogy a volt és az ohm

egységének referenciaetalonjait az előbb felidézett, két nagyságrenddel pontosabban reprodukálható Josephson-effektusra illetve Klitzing-effektusra<sup>4</sup> alapozzák.

A CIPM egyidejűleg az állandók

$$K_J = 483\,597,9 \text{ GHz/V}; \quad R_K = 25\,812,807 \, \Omega$$

értékeit javasolta:

Megjegyezzük, hogy a Josephson-effektusra és a Kvantum-Hall-effektusra jelenleg csak referenciaetalont lehet alapozni, mert ezek az effektusok a megfelelő egységet nem azok SI-beli meghatározása szerint valósítják meg. Ennek az a következménye, hogy az e két effektust megvalósító berendezésekkel kapott eredmények reprodukálhatóságát nem lehet pontosságként értelmezni. A  $K_J$  és az  $R_K$  javasolt értékek egyezményes (konvencionális) értékek, éppúgy, mint a vákuumbeli fénysebesség értéke. Pontosságukat a kifejezésükhöz alkalmazott SI-egységek pontatlansága korlátozza.

### A tömegmérés technikája

Az alapvető tömeg-méréstechnika a tömegek mérleggel végzett összehasonlítása. A tömegméréshez összehasonlító mennyiségként súlyokra, összehasonlító eszközként pedig mérlegre van szükség. Az összehasonlításon alapuló tömegmérés az utóbbi 100 évben – és különösen a legutóbbi évtizedben – rohamosan fejlődött.

A mérési bizonytalanságok elemzéséhez célszerű a tömegmérések két kategóriáját megkülönböztetni. Az első kategóriába a makroszkopikus méretű objektumok mérése sorolható, amit a *makroszkopikus tömegek metrológiájának* is neveznek [5]. A makroszkopikus méretű objektumok tömegének az értéke általában kilogrammban vagy grammban fejezhető ki, és a mérés eszköze a mérleg. A mérlegeléses tömegmérések referenciaetalonja<sup>5</sup> (jelenleg) a Kilogramm Nemzetközi Prototípusa. A prototípus megfelelő referenciaetalon a makroszkopikus tömegméréseknél, és az marad a belátható jövőben még akkor is, ha a kilogramm definíciójaként az ebben a cikkben bemutatott változatok valamelyikét fogadják el.

A fizikai és kémiai kutatásokban azonban atomok és elemi részek tömegét kell mérni, többnyire tömegspektrometriai módszerrel. Ezeknél a méréseknél a referenciaetalon az u-val jelölt egységes atomi tömegegység, amely definíció szerint a szén 12 atom tömegének egytizenketted része, és amely  $m_u$  atomi tömegegység néven is ismert. Ezek a mérések képezik a második kategóriát, amit a *mikroszkopikus tömegek metrológiájának* lehet nevezni.

Jelenleg az a helyzet, hogy mind a makroszkopikus, mind a mikroszkopikus tömegek relatív mérése sokkal nagyobb precizitással végezhető el, mint a két kategóriába sorolt tömegek egymással való összehasonlítása. Két egykilogrammos tömegmértéket ma a legkorszerűbb mérlegekkel  $1 \times 10^{-9}$ -nél kisebb relatív bizonytalansággal lehet összehasonlítani, ami  $1 \mu\text{g}$  abszolút bizonytalanságnak felel meg. Hasonlóképpen egy elektron  $m_e$  tömege az egységes  $m_u$  atomi tömegegységhez viszonyítva  $4,4 \times 10^{-10}$  relatív bizonytalansággal határozható meg. Ha

<sup>4</sup> A Klitzing-effektus a Kvantum-Hall-effektus ritkábban használt megnevezése.

<sup>5</sup> A VIM 3. kiadásának tervezetében adott meghatározás szerint: a referenciaetalon egy adott szervezetnél vagy egy adott helyen, adott fajtájú mennyiség más etalonjainak kalibrálásához használt etalon

azonban bármelyik elemi rész tömegét a jelenleg érvényes SI-kilogrammban kell mérni, illetve kifejezni, akkor a relatív bizonytalanság  $2 \times 10^{-7}$  lesz, vagyis több mint két nagyságrenddel nő. A helyzetet tovább nehezíti, hogy a fizikai állandók többségének SI-egységben kifejezett értéke függ a kilogramm megvalósításától. Ezeknél a méréseknél a mérési bizonytalanságot túlnyomó részben az atomok vagy elemi részek tömegének a Nemzetközi Kilogramm Prototípusra való vonatkoztatása, más szóval a tömegértékeknek az SI kilogramm-egységben való kifejezése okozza.

Mi tehát a jelenlegi helyzet és milyen fejlemények várhatók? Ha megváltoztatnák a kilogramm definícióját, referenciaként (vonatkoztatási alapként) valamelyik fizikai állandót vagy egy atom tömegét felhasználva, akkor ebből azonnal következne, hogy minden fizikai állandó és minden elemi rész tömege két nagyságrenddel kisebb bizonytalansággal lenne ismert, mert az SI egységeiben való kifejezésük nem igényelné a makroszkopikus és a mikroszkopikus tömegek közötti áthidalás ismeretét. Hasonlóképp javulna az  $e$  elemi töltésen és a  $K_J$  Josephson-állandón alapuló elektromos mérések pontossága.

**A Nemzetközi Kilogramm prototípus  $m(K)$  értéke és relatív standard bizonytalansága, valamint négy fizikai állandó értéke és relatív standard bizonytalansága a kilogramm új definíciója esetén**

Kulcs a táblázat megértéséhez:

- a.  $m(K)$  rögzített (ez a jelenlegi helyzet)
- b.  $h$  rögzített (az új definíció)

érték	relatív bizonytalanság
<i>A nemzetközi prototípus <math>m(K)</math> tömege</i>	
a. 1,000 000 00 kg	(pontosan)
b. 1,000 000 00	$0,17 \times 10^{-6}$
<i>A <math>h</math> Planck-állandó</i>	
a. $6,626\ 069\ 3 \times 10^{-34}$ J·s	$0,17 \times 10^{-6}$
b. 6,626 069 311	(pontosan)
<i>Az <math>m_e</math> elektrontömeg</i>	
a. $9,109\ 382\ 6 \times 10^{-31}$ kg	$0,17 \times 10^{-6}$
b. 9,109 382 551	$0,0067 \times 10^{-6}$
<i>Az <math>e</math> elemi töltés</i>	
a. 1,602 176 53	$0,085 \times 10^{-6}$
b. 1,602 176 532	$0,0017 \times 10^{-6}$

További következmény, hogy a Nemzetközi Kilogramm Prototípus többé nem lenne „definíció szerint” 1 kilogramm, hanem kísérleti úton (méréssel) kellene az értékét megállapítani. Az új definícióban megjelenő állandót – vagyis a tömegértéket - azonban úgy kellene megválasztani, hogy kezdetben még „pontosan” (körülbelül  $2 \times 10^{-6}$  relatív bizonytalansággal), 1 kg legyen. Ezt a bizonytalanságot tulajdonítják a jelenlegi definíció fenntartása esetén minden atomtömeg értéknek, a jövőben azonban lehetséges lesz a Nemzetközi Kilogramm Prototípus értékét úgy megállapítani, hogy az némiképp eltérjen az 1 kg-tól. Nem valószínű, hogy ez az eltérés valaha is nagyobb lesz, mint  $2 \times 10^{-6}$ . Ezt tartják a definíció megváltoztatásával járó hátrányos következménynek azok, akik a makroszkopikus tömegmérésekben érdekeltek.

Ha a jelenlegi definíció változatlan marad, akkor minden, az SI egységeiben kifejezett fizikai állandó értékének továbbra is  $2 \times 10^{-6}$  relatív bizonytalansága lesz. Aligha kétséges tehát, hogy a kilogramm definícióját a két változat valamelyikének megfelelően módosítani fogják.

### A kilogramm újra-meghatározásának elvi alapjai

Az újra-meghatározás elvi alapjai jórészt ugyanazok, amelyeket a CIPM és a CCU 2005-ben, az SI alapegységek újra-meghatározásáról szóló ajánlásában már lefektetett. Legfontosabb, hogy a jelenlegi SI szerkezetét - vagyis a jelenlegi alapmennyiségeket és egységeiket - változatlanul meg kell tartani. Ennek oka az, hogy ezek a mennyiségek és egységek kielégítik a metrológiai és a tudományos közösségek jelenlegi és jövőbeli szükségleteit, jól megismerhetők és mérhetőek az SI-t világszerte használók számára.

Ez a felfogás nem engedi érvényre jutni az SI gyökeres szerkezeti módosítására vonatkozó elképzeléseket. Ilyen elgondolás például, hogy a tömeget alapegységként az energia helyettesítse. A változtatás származtatott mennyiséggé tenné a tömeget, ami oda vezetne, hogy a joule válna alapegységgé, és a kilogramm származtatott egységgé. Származtatott mennyiséggé tenné az áramerősséget, ami oda vezetne, hogy a coulomb válna alapegységgé és az amper származtatott egységgé. Ez a kiindulási alap ugyancsak megakadályozná, hogy a jelenlegi tömeg egység, a kilogramm nevét és jelét, a kg-ot olyan új névvel és egységgel váltsák fel, amellyel SI-prefixumok alkalmazhatók.

Egy másik alapelv szerint nem mindig szükséges az, hogy egy SI alapegység új meghatározása az egység kisebb bizonytalansággal történő megvalósítását tegye lehetővé. A metrológia és a tudomány abból származó előnyei, hogy a kilogramm jelenlegi meghatározását olyannal váltják fel, amely azt a  $h$  Planck-állandó pontos értékével kapcsolja össze, sokkal fontosabbak, mint az a jelentéktelen mértékű bizonytalanság-növekedés, ami a tömeg egységének megvalósításában felléphet. Tény, hogy a nemzetközi prototípus  $m(K)$  tömegének a fizikai állandókhöz viszonyított „bizonytalansága” nem kellőképpen ismert. Tény az is, hogy a nemzetközi prototípus  $m(K)$  tömege időben viszonylag lassan változik a világ különböző pontjain használt, ugyanolyan életkorú Pt-Ir etalonok összességének tömegéhez képest. Ez az utóbbi változás száz év alatt mintegy 50  $\mu\text{g}$ .

Az újra-meghatározandó egységeket és azokat az állandókat, amelyekhez kapcsolódnak, úgy kell megválasztani, hogy mind a metrológia, mind a tudomány számára a legtöbb hasznot hozzák. A [2] irodalom szerzői szellemesen megfogalmazzák a jelenlegi SI egyik jelentős problémáját: két urat kell szolgálnia, amelyek versenyeznek egymással, és gyakran keverednek konfliktusba. Az első a „mindennapi kereskedelem” ami olyan egységrendszert kíván, amelynek alkalmazhatósága a nagyáruházi csirkevásárlástól a nemzetközi úrállomás megépítéséig terjed. A második az, amit „kvantumfizikának” hívunk, és ami olyan egységrendszert követel, amely alkalmas a fizikai állandók meghatározására, és a természet olyan alapvető építőköveinek meghatározására, amilyen például az elektron  $m_e$  tömege vagy  $\mu_e$  mágneses momentuma. A mindennapi kereskedelem általában nem igényli a lehető legkisebb bizonytalanságokat, kivéve az időt (egy kereskedelemben kapható műholdas navigációs rendszer időskálát és a lehető legnagyobb pontosságú stabil órákat igényelhet), az általános fizika és főleg a kvantumfizika azonban a lehető legkisebb bizonytalanságok elérésének követelményét támasztja. Napnál világosabb a probléma, mint R. Davis<sup>6</sup>

---

<sup>6</sup> Davis R S 2005 *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A* **363** 2249–64



fogalmazott: „A 21. században hogyan engedhető meg, hogy egy 19. századi Pt-Ir ötvözetből készült fémdarab, amit Sèvresben búra alatt őriznek, korlátozza a  $h$  és az  $m_e$  értékére vonatkozó ismereteinket?”

Végül alapelv az is, hogy az egység új meghatározása ne okozza a folytonosság megszakadását az egység értékében. Ez azt jelenti, hogy a  $h$ ,  $e$ ,  $k$  és  $N_A$  állandók kiválasztott, az új meghatározásokban alkalmazott értékeinek, olyan közel kell lennie az SI értékükhöz, amennyire azt jelenlegi ismereteink megengedik. Nem választható például a Planck állandónak és az elemi töltésnek az értéke a Josephson állandó illetve a Klitzing állandó  $K_{J-90} = 2e_{90}/h_{90} = 483\,594,9 \text{ GHzV}^{-1}$  és  $R_{K-90} = h_{90}/e_{90}^2 = 25812,807$  konvencionális értéke alapján, mivel a  $K_{J-90}$  és az  $R_{K-90}$  értékek jelentősen eltérnek a Josephson állandó és a Klitzing állandó SI egységekben kifejezett  $K_J$  és  $R_K$  legjobb értékeitől.

### **A kilogramm újra-meghatározásának időzítése.**

Van azonban még egy fontos, eldöntendő kérdés: a javasolt módosítások bevezetésének időzítése. Az Általános Súly-és Mértékügyi Értekezlet a Nemzetközi Súly- és Mértékügyi Bizottság (francia elnevezésének rövidítése: CIPM) és annak tanácsadó bizottságai által előterjesztett ajánlások alapján változtatja meg a Nemzetközi Mértékegység-rendszer alapegységeit. A CGPM négyévenként ülésezik, és a 23. CGPM-re éppen e cikk megírásakor, 2007 októberében kerül sor. A 25. CGPM dátuma 2011 októbere. A kérdés az, mikor kerüljön sor a változtatásra.

A minél korábbi időpont mellett szól, hogy a javaslat elfogadása esetén a fizikai állandók értéke sokkal kisebb bizonytalansággal lesz ismert, és mellette szól az a tény is, hogy a CODATA<sup>7</sup> adatok jövőbeli felülvizsgálatai során az értékekben csak zérussal egyenlő vagy nagyon kicsi változtatásokra lesz szükség.

A változtatás további előnye, hogy olyan kilogrammot használhatunk, amelynek a definíciója fizikai állandóra van visszavezetve. Meggondolandó azonban, hogy a wattmérleges mérések eredményei néhány éven belül várhatóan javulni fognak, és ez a Nemzetközi Kilogramm Prototípus értékének becslésében kis változtatásokkal járhat együtt. Csaknem bizonyosra vehető, hogy a Nemzetközi Kilogramm Prototípust továbbra is közvetítő referenciaetalonként fogják használni a makroszkopikus tömegmérésekben. A változtatások azonban várhatóan nem fogják meghaladni azt a bizonytalanságot, ami a Nemzetközi Kilogramm Prototípus egy valódi természeti állandóhoz viszonyított sodródásának (driftjének) tulajdonítható.

Másrészről, a változtatás elhalasztásának lehetséges előnye, hogy az új wattmérleges eredmények néhány éven belül nem fognak a Nemzetközi Kilogramm Prototípus megváltozásához vezetni, és az még mindig „definíció szerint” 1 kg lehet, noha fennmarad a valódi tömegértékének driftjéhez kapcsolódó kétség. A változtatások késleltetése esetén azonban elvész a fizikai állandók értékének kisebb bizonytalanságában megnyilvánuló előny, és az új wattmérleges mérések a soron következő CODATA felülvizsgálat alkalmával jelentős változásokra vezethetnek a fizikai állandók értékében. Ez különösen kellemetlen lenne az

---

<sup>7</sup> A CODATA (Committee on Data for Science and Technology) interdiszciplináris tudományos bizottság, amely létrehozta a Fizikai Állandók Munkacsoportját. A CODATA rendszeresen kiadja a szabványos kézikönyvi adatok, és köztük a fizikai állandók, ajánlott értékeit. Az adatokat először 1973-ban, legutóbb pedig 2002-ben tette közzé.

atom- és molekulafizikával valamint az elektromos mérésekkel foglalkozók számára, akik munkájukban felhasználják a Josephson-állandót és az elemi töltést.

Választani kell tehát a között, hogy most kerüljön-e sor a kilogramm újra-definiálására – úgy, hogy természeti állandóra legyen vonatkoztatva, a fizikai állandók legyenek pontosabban ismertek és a közeli jövőben ne kelljen azokat megváltoztatni – vagy halasszák-e el a döntést, míg az új kísérleteknek köszönhetően egy megadott értékre, mintegy  $2-3 \times 10^{-8}$ -ra, csökken az atomtömegek és a Nemzetközi Kilogramm Prototípus közötti összefüggés bizonytalansága, egy időre belenyugodva a kétségtelen hátrányokba.

Ismételten hangsúlyozzuk: a kilogramm újra-meghatározásából származó legjelentősebb haszon, hogy a tömeg metrológiája megszabadul a mesterséges mértékre alapozott egységtől. Ez azt jelenti, hogy a különböző laboratóriumokban tetszés szerint megvalósítható az egység. Régóta kívánt cél, hogy a kilogramm bármikor, bárhol, bárki által megvalósítható legyen, és a bizonytalanságot ne korlátozza más, mint az adott laboratóriumban rendelkezésre álló pénzügyi és/vagy humán erőforrások. A további technikai fejlődéssel lehetővé válik a wattmérlegek kereskedelemben való beszerzése, és ezzel széles körben megvalósulhat az új egység közvetlen létrehozása. Ennek az útnak a járhatóságát bizonyítja a tény, hogy a kereskedelemben kapható Josephson-berendezések és – kisebb mértékben – a kereskedelemben kapható Kvantum-Hall-ellenállás etalonok képessé tették a nemzeti metrológiai intézeteket az  $e$  két effektuson, valamint a  $K_{J-90}$  és az  $R_{K-90}$  állandók egyezményes értékén alapuló gyakorlati elektromos egységek létrehozására. A legjobb wattmérlegeken (vagy természetesen bármely más alkalmas módszerrel) alapuló kilogramm-megvalósítás elfogadott  $2 \times 10^{-8}$  relatív standard bizonytalansága úgy értelmezhető, hogy a tömegetalonok nemzeti metrológiai intézetekben végzett kalibrálása során az eredményekben fellépő bármilyen változás maguknak a tömeg etalonoknak, és nem az egység-megvalósításoknak tulajdonítható.

A BIPM továbbra is tömegkalibrálási szolgáltatásokat nyújt a Méteregyezmény tagországainak, és az utazó tömegetalonjaik megfelelő kulcs-összehasonlításai<sup>8</sup> révén segíthet a nemzeti metrológiai intézeteknek abban, hogy az új egység-meghatározások egymás között a kívánt bizonytalanságon belül összhangban legyenek.

### ***Köszönetnyilvánítás***

*Köszönetemet fejezem ki Gáti Ernő kollégámnak a kézirat elkészítését nagyban segítő, hozzáértő észrevételeiért.*

### **Irodalmak:**

- [1] Mills I M, Mohr P J, Quinn T J, Taylor B N and Williams E R 2005 *Metrologia* **42** 71–80
- [2] Ian M Mills, Peter J Mohr, Terry J Quinn, Barry N Taylor és Edwin R Williams: *Redefinition of the kilogram, ampere, kelvin and mole: a proposed approach to implementing CIPM recommendation 1 (CI-2005)* *Metrologia* **43** (2006) 227–246.
- [3] BIPM 2006 *The International System of Units 7<sup>th</sup> edn and Supplement 2000: Addenda and Corrigenda to the 8<sup>th</sup> edition (2006)* (S' evres, France: Bureau International des Poids et Mesures)
- [4] Quinn T J 2000 *Metrologia* **37** 87–98
- [5] Ian M Mills: An Update on the kilogram. *Chemistry international* (2005 október-november)

---

<sup>8</sup> A kulcs-összehasonlítások nemzetközi összehasonlító mérések, amelyek célja az, hogy bizonyítsák a nemzeti etalonok metrológiai egyenértékűségét.