

*Egységek és etalonok* gyűjtőcím alatt a hosszúság, a tömeg és az idő egységét és etalonját ismertetjük Hírlevelünk következő számaiban. A cikkek bemutatják a három mennyiség egységének és etalonjának létrehozását, továbbfejlesztését és az etalonok megvalósításához jelenleg használt technikai eszközöket. Ezeket a közleményeket elsősorban azoknak az olvasóknak ajánljuk, akik érdeklődnek a téma metrológiai hátterének részletei iránt is.

## **Egységek és etalonok**

### **A hosszúság egysége és etalonja**

*Ez a cikk a hosszúság 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 Mértékegységrendszer (SI)” című, angol nyelvű brosúrájának 2006. évi, 8. kiadása; a PTB etalonokról szóló 1983. évi kiadványa; Tomanyiczka Kálmán „A hosszúság mérésének fejlődése a 'királyi könyöktől' a lézerinterferométerig” című kézírata és Terry J. Quinn 1994/95-ben, a *Metrologia* című lapban megjelent „Az SI alapegységei, azok pontossága, átszarmaztatása és nemzetközi visszavezetettsége” című cikke.*

#### **Bevezetés**

A hosszúság egyike azoknak a mennyiségeknek, amelyek pontos és egységes mérése iránt az igény már az ókorban jelentkezett. Ezt az igényt a kibontakozó kereskedelem táplálta, mivel a hosszúság és a hozzá kapcsolódó mennyiségek - a terület vagy felület és a térfogat - mérését az áruk jelenős részénél a mennyiségi meghatározás fontos eszközeként alkalmazták. Az egységes mérés alapfeltétele az általánosan elfogadott, minden érdekelt felet kielégítő mértékegység (röviden: egység) bevezetése volt.

A Nemzetközi Mértékegység-rendszerben (az SI-ben) a hosszúság egysége a *méter*. Története a 18. században kezdődik. A francia forradalom eszmeiségéből következett az addig használatban levő nemzeti hosszúság-egységek zavaróan nagy választékának megszüntetésére való törekvés, és az a szándék, hogy mindenütt a világon ugyanazt az egységet használják.

1790-ben a francia nemzetgyűlés elfogadta, hogy Huygens másodperc-ingájának hosszúsága legyen a *méter*.<sup>1</sup> Ennek a döntésnek lényeges eleme volt, hogy nem az addig használt különféle hosszúság-egységek valamelyikére esett a választás, hanem egy új nevet viselő egységet, a métert fogadták el.

1790 és 1799 között méréseket végeztek abból a célból, hogy a métert a Föld délköre negyedének tízmilliomod részeként határozzák meg, annak érdekében, hogy az új hosszúság-egységet a minden ember számára közös élettér, a Föld, méreteiből vezessék le.

---

<sup>1</sup> A hosszúság egységének elnevezése az ó-görög metron szóból származik, ami „mértéket” jelent.

1799-ben elkészítették a 90% platina és 10% irídium ötvözetéből készült véglapos mértéket, a levéltári métert (franciául: mètre des archives). Elnevezése onnan ered, hogy a párizsi levéltárban helyezték el azzal a szándékkal, hogy, amint azt a rajta olvasható felirat jelzi, „Minden időkre minden nemzeteknek” egységes hosszúság-etalonként<sup>2</sup> szolgáljon. Ennek a mértéknek a hosszúsága csak közelítőleg volt egyenlő a Föld délköre negyedének tízmilliomod részével.

1870-ben - 70 évvel később - a Nemzetközi Méterbizottság ezt a levéltári métert fogadta el a méter megvalósításaként. Az új hosszúság-egység elfogadásáról és bevezetéséről szóló, 1875-ben megkötött nemzetközi megállapodás ennek megfelelően a „Méteregyezmény” elnevezést kapta.

1927-ben a 7. Általános Súly-és Mértékügyi Értekezlet (francia elnevezésének rövidítésével: CGPM), a nemzetközi prototípuson alapuló következő méter-meghatározást fogadta el: *A hosszúság egysége a méter, amit a Nemzetközi Súly- és Mértékügyi Hivatalban, 0°-on őrzött, platina - irídium rúdön megjelölt két középponti vonal tengelyei közötti távolság határoz meg. Ezt a méterrudat az 1. Általános Súly- és Mértékügyi Értekezlet Prototípusként definiálta. Normál légköri nyomásnak van kitéve, és két legalább 1 cm átmérőjű hengeren támaszkodik, amelyek szimmetrikusan helyezkednek el ugyanazon a vízszintes síkon, egymástól 571 milliméter távolságra.*

Ezt a definíciót a 11. CGPM 1960-ban érvénytelenítette, és ugyanakkor elfogadta a méter hullámhosszra alapozott definícióját.

1982 júniusában a Méterdefiníció Tanácsadó Bizottsága (francia elnevezésének rövidítésével: CCDM) a méternek a terjedési időn alapuló, ma is érvényes, új definícióját javasolta. Ezeket a meghatározásokat a hosszúságmérés technikájában nyomon követhető fejlődés, a fizikai alapok és a fényinterferenciás mérés technika vázlatos ismertetése után mutatjuk be.

## **A hosszúságmérés technikájának fejlődése**

A hosszúság mérésére kezdetektől alkalmazott mérés technika a hosszúságok egymással való összehasonlítása. A két összehasonlítandó hosszúság közül az egyik mérőtárgy az etalon, a másik a vizsgálati tárgy. Az összehasonlítás gyakorlatilag úgy történik, hogy a mérendő szakaszra ráhelyezik az etalonként használt mérőrudat. Az ilyen mechanikus mérésnél a mérendő hosszúságot körzónyílásba is lehet fogni, és „átvinni” a mérőrúdra. Elvileg „körzónék” tekinthető két, egymással mereven összekapcsolt mérőmikroszkóp is. A mérőrudak eltolható kocsin helyezhetők el. A nemzetközi méter etalonról az egység átszármaztatása ilyen összehasonlításos módszerrel történt, és a mérési pontosság az osztásvonalak akkoriban elérhető minősége folytán  $\pm 0,1 \mu\text{m}$  értékre korlátozódott.

A 20. század második felében a hosszúság-egység 1889-ben elfogadott, a levéltári méteren alapuló definíciója már nem felelt meg a kor követelményeinek.<sup>3</sup> Felismerték, hogy a levéltári

---

<sup>2</sup> A Nemzetközi Metrológiai Értelmező Szótár 3. kiadásának tervezetében az etalon egy adott mennyiség definíciójának megvalósítása, megállapított értékkel és mérési bizonytalansággal, amelyet metrológiai referenciaként használnak.

<sup>3</sup> Kétségbevonható, hogy egy olyan amorf vagy sokkristályos test hosszúsága, amilyen a méter prototípusa, mennyire tekinthető állandónak. Az anyagban felléphetnek átkristályosodások.

méter, mint egyetlen és egyedül létező prototípus, elveszhet, vagy azt külső behatások megrongálhatják. Ezen kívül nem mindenki és nem mindenkor férhet hozzá a prototípushoz, és meg kell elégednie a nemzetközi etalon másolataival. Olyan megoldást kellett találni, amely megfelel az egységeket megvalósító etalonokkal szemben támasztott alapvető követelményeknek, nevezetesen, hogy azok (1) a pontosság legmagasabb szintjét biztosítsák, (2) hosszú idejű stabilitással rendelkezzenek és (3) szükség esetén újra-előállíthatók legyenek. Világossá vált, hogy az egységeket, a fizikai kutatási eredmények felhasználásával, atomi vagy kvantumjelenségekkel, és így a fizikai állandókkal kell összekapcsolni, azaz olyan mennyiségekkel, amelyek változatlansága biztosra vehető.

Ezt Maxwell már több mint egy évszázaddal ezelőtt felismerte, amikor 1870-ben ezt írta: „Ha a hosszúság, az idő és a tömeg abszolút maradandó etalonjait akarjuk megvalósítani, akkor azokat nem bolygónk mozgásában vagy méreteiben kell keresnünk, hanem az elpusztíthatatlan, megváltoztathatatlan és egymáshoz tökéletesen hasonló molekulák hullámhosszában, rezgési periódusában és abszolút tömegében”. A tizenkilencedik század végén azonban sem a fizika, sem a technológia nem volt még olyan fejlett, hogy szükség lett volna ilyen egységekre, vagy hogy ilyen egységek megvalósíthatók lettek volna.<sup>4</sup>

## Fizikai alapok

A következőkben röviden áttekintjük a hosszúságmérés technikájának fejlődését lehetővé tevő fizikai alapokat.

A tudomány új ismereteket tárt fel a szilárdtestek szerkezeti felépítésének és a fény és az anyag közötti kölcsönhatásnak a megismerésében. Felismerték, hogy az azonos jellegű atomok szerkezeti felépítése változatlan marad, és ez állandó fizikai mennyiségeket tesz hozzáférhetővé a hosszúságmérés számára. Mindenekelőtt ki kell küszöbölni az atomot érő minden külső zavaró hatást. Ez az állapot kísérletileg csak közelítő, de elképzelhető, hogy a nyugalmi állapotot extrapolációval el lehet érni. Nyugalmi állapotban az atomnak az atommagot körülvevő elektronburokban levő elektronjai egy sor állandó energiájú állapottal rendelkeznek. Az atomnak az egyik energiaállapotból a másikba való átmenete együtt jár egy foton befogásával vagy kibocsátásával. Befogáskor fényabszorpcióról (az atomnak nagyobb energiája lesz, mint előzőleg), kibocsátáskor fényemisszióról van szó (ekkor az atom energiája lecsökken). Erre a jelenségre is érvényes az energia-megmaradás törvénye, mely szerint a foton  $\Delta E$  energiája egyenlő a kérdéses atomi állapotok energiakülönbségével.  $\Delta E$  arányos a fotonhoz tartozó hullám  $v$  frekvenciájával, és a  $h$  Planck-féle hatáskvantummal, azaz:

$$\Delta E = h \cdot v.$$

Az elektromágneses sugárzások spektrumának felvételére vagy leírására szolgáló skálaként mind a  $\lambda$  hullámhossz, mind a  $v$  frekvencia használható. Elektromágneses sugárzás a fény is, amelynek *terjedési sebessége vákuumban* színszóródástól mentes, azaz nem függ olyan spektrális mennyiségektől, mint  $\lambda$  vagy  $v$ , és amely - akár csak a  $h$  hatáskvantum - univerzális természeti állandónak tekinthető.

---

<sup>4</sup> Bár Michelson néhány évvel későbbi munkái alapján műszakilag már lehetett volna a métert a fény hullámhossza alapján definiálni.

Ha egy kémiai elem atomjait egy lámpa elektromos kisütésével fénykibocsátás céljából gerjesztik, akkor a sugárzás csak olyan fotonokat tartalmaz, amelyek energiája az atomokban mint energiakülönbség előfordul. Ekkor a meghatározott elem atomjainak spektrumvonalai jönnek létre.

Ezek a fizikai alapok megmagyarázzák, hogyan valósítható meg a hosszúság-etalon létrehozására alkalmas, meghatározott hullámhosszú sugárzás. A méter megvalósítására alkalmas technikák közül részletesebben a *fényinterferenciás mérés technikával* és a *terjedési időre alapozott meghatározás mérés technikájával* foglalkozunk.

## Fényinterferenciás mérés technika

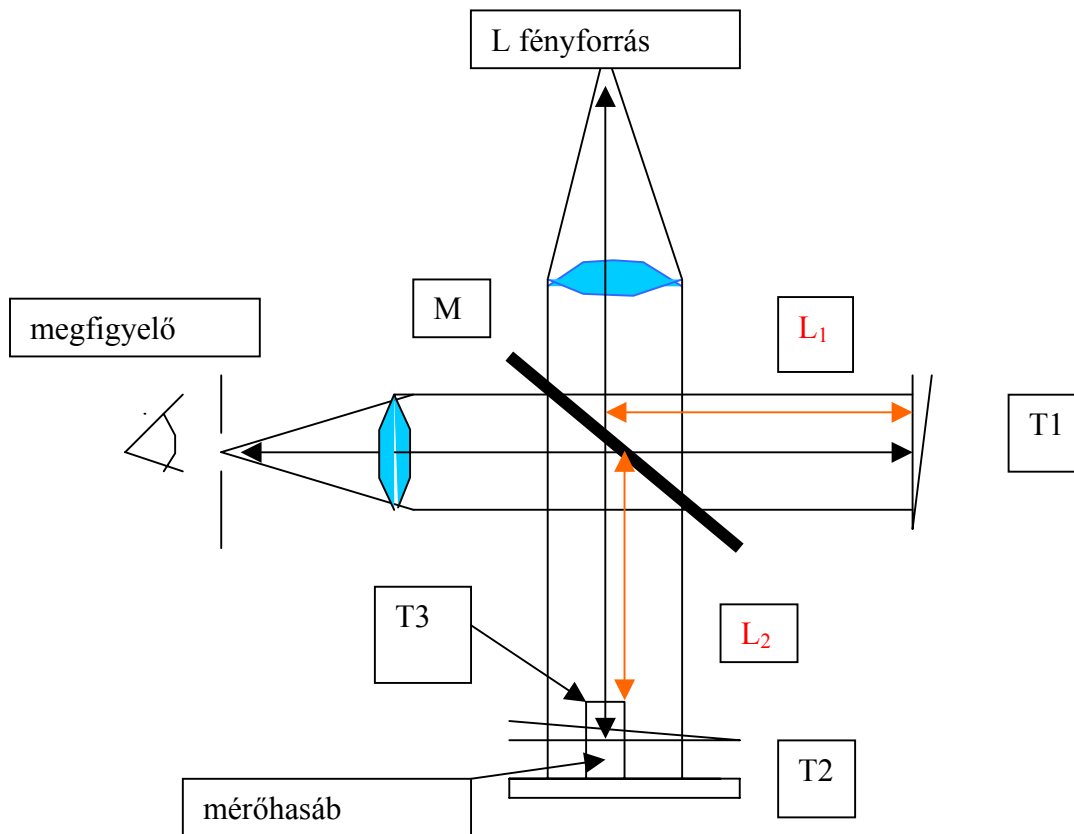
A fényt nem csupán megfordítani vagy önmagába visszaverődtetni lehet, hanem félig áteresztő tükrökön át bocsátva szét is lehet választani, majd ismét össze lehet vezetni. A két rész hullámnyaláb, amikor ismét találkozik, egymásra helyeződik, más szóval interferál: gyengíti vagy erősíti egymást. A rezgési amplitúdók a fényterjedés irányában periodikusan ismétlődnek. Ez a térbeli periódus hosszúsága a *hullámhossz*. A rész hullámok által befutott útban úgynevezett *fényút-különbség* jön létre. Ez a  $d$  útkülönbség határozza meg a kialakuló interferenciát, vagyis azt, hogy a találkozó rész hullámok erősítik-e vagy gyengítik-e egymást. Maximális erősítés akkor lép fel, ha az útkülönbség  $\lambda$ -val egyenlő, maximális gyengítés pedig akkor, ha az útkülönbség  $\lambda/2$ .

Az interferencia jelenségét az interferométer nevű mérőelrendezéssel lehet létrehozni. Ebben a berendezésben az L monokromatikus fényforrásból kiinduló sugárnyaláb a 45 fokos szög alatt elhelyezett, M félig áteresztő lemezre esik, ahol kettéosztódik. A sugárnyaláb egyik része a lemezre eső sugár irányára merőlegesen, attól  $l_1$  távolságra levő T1 tükörrre esik, és onnan visszaverődik a lemezre. A sugárnyaláb másik része a lemezre eső sugár irányában, attól  $l_2$  távolságra elhelyezett T2 tükörről, ugyancsak a lemezre verődik vissza. A fényút-különbség  $d = l_1 - l_2$ . Ha a fényvisszaverő tükrök ék formájában vannak kialakítva, vagy ha a beeső sugárnyaláb irányára nem pontosan merőlegesen vannak beállítva, akkor a T1 tükör irányába néző megfigyelő a Fizeau-féle interferenciaképet látja: azonos szélességű sötét és világos csíkok sorozatát.



$$\begin{array}{c} \dots \rightarrow \left| \frac{\lambda}{2} \right| \leftarrow \\ \dots \rightarrow \left| \lambda \right| \leftarrow \end{array}$$

Egy csíktávolság – vagyis két interferenciacsík egymástól való távolsága - „egy hullámhossznyi ( $\lambda$ )” útkülönbségnek, vagy az ékvastagság  $\lambda/2$  nagyságú változásának felel meg.



Egy mérőhasáb hosszúságának meghatározása a következőképpen történik:

A  $T_2$  tükörrre feltapasztják a mérőhasábot. A mérőhasáb felülete ekkor egy  $T_3$  tükörfelületet képez, és ennek megfelelően két interferenciakép alakul ki. A mérőhasáb hossza a két interferenciakép egymáshoz viszonyított eltolódásából számítható ki. A mérés lényege annak a megállapítása, hogy a párhuzamos mérőfelületű mérőhasáb hosszúsága a fény hullámhosszának hányszorosa, mivel az interferenciaképben  $\lambda$ . távolságonként jelenik meg egy sötét és egy világos interferenciacsík. A csíkok egymástól  $\lambda/2$  távolságra levő fénysíkoknak felelnek meg. Azt kellene tehát megszámolni, hányadik sík metszi a mérőhasáb felületének a közepét, ez azonban gyakorlatilag lehetetlen, mert például egy 30 mm-es mérőhasáb hosszúságában kereken 300 ezer ilyen fénysík van. A mérőhasáb hosszúságát ezért első közelítésben az

$$L = x \lambda/2 + n \lambda/2$$

összefüggés adja meg, ahol

$L$  – a mérőhasáb hosszúsága

$x$  – a mérőhasáb hosszúságában foglalt fényhullámhosszak ismeretlen egész száma

$\lambda$  - a méréskor használt fény hullámhossza

$n$  - a csíktávolság törtrésze.

Mivel  $x$  ismeretlen,  $L$  sem határozható meg. Ha viszont a mérést négy különböző hullámhosszúságú fényvel - ezek: a vörös, a sárga, a zöld és az ibolya - megismétlik, vagyis ha a mérőhasáb hosszúságát négy különböző osztásértékű „fénymérőléccel” megméri, akkor

minden egyes ismétlésnél más és más  $n$  érték adódik. Keresni kell azt az  $L$  értéket, amelyre teljesül az

$$n_m - n_{sz} = 0$$

feltétel, ahol  $n_{sz}$  a számított,  $n_m$  a mért érték.

A mérőhasáb  $L$  névleges hosszúságát el kell osztani az egyes színekhez tartozó fél-hullámhosszakkal:

$$L/(\lambda/2) = x + n,$$

és így kiadódik, hányszor van meg az adott fény fél-hullámhossza a mérőhasáb hosszúságában. Az egyes színek esetében a számítással kapott és méréssel kapott  $n$  értékek eltérnek egymástól, mivel a mérőhasáb tényleges és névleges hosszúsága is különbözik. A mérés kiértékeléséhez készített, különleges számológép segítségével meghatározható a mérőhasáb névleges hosszúságától való,  $\mu\text{m}$  egységben kifejezett eltérés.

Az interferométer alkalmazásának másik módja a  $T_2$  tükör mozgatása. Ekkor a látómezőben az interferencia folytán periodikusan ismétlődő világos és sötét csíkok jelennek meg, melyek távolsága pontosan  $\lambda/2$ . Ez a *csíkszámolásos fényinterferenciás méréstechnika*, amellyel mechanikai úton megvalósíthatatlan, rendkívül finom,  $0,3 \mu\text{m}$  osztásértékű, egyenlő osztásközű (ekvidisztáns) skálát lehet létrehozni.

## Hullámhossz etalonok

Már 1827-ben felvetődött az a gondolat, hogy a méter természetes megvalósítása a fényhullámhossz lehetne. 1883-ban Michelson és Morley az interferométer alkalmazásával igazolta ezt az elgondolást.

A hosszúság hullámhosszetalonjai a *gázkisülési lámpák*. Az interferenciás méréstechnika jelentősége abban áll, hogy vannak hullámhosszetalonként alkalmazható, jól reprodukálható tulajdonságokkal rendelkező sugárzások. Maga a hullámhossz nem használható etalonként. Nehéz is elképzelni egy hullámhosszat, mint hosszúságetalont, sőt még az sem könnyű, hogy elképzeljünk egy hullámhosszat a fénysugárban. A hullámhossz nem látható, nem megfogható. Ezen kívül, a látható fény hullámhossza nagyon kicsi: a  $0,45 \mu\text{m}$  és  $0,70 \mu\text{m}$  közötti tartományban található. Az emberi hajszál átmérője a fény hullámhosszának mintegy 100-szorosa.

A csíkok eltolódásakor az interferenciacsíkok közötti távolság, a távolság  $1/30$  részének megfelelő felbontással, különleges berendezések alkalmazása nélkül is megbecsülhető, és ez  $1 \text{ m}$  távolságra vonatkoztatva  $\pm 1/30 \cdot (\lambda/2)$  azaz mintegy  $\pm 0,01 \mu\text{m}$  mérési bizonytalanságnak, vagyis  $\pm 10^{-8}$  relatív bizonytalanságnak felel meg.

A gyakorlatban a hullámhosszetalonok megvalósítása nem olyan egyszerű és problémamentes, mint ahogyan az elméletből következne. A sugárzó atomok a környezetükben levő részecskék zavaró hatása alatt állnak, és ezek a hatások változásokat idéznek elő a fotonok frekvenciájában. Ekkor a frekvencia, a hullámhossz vagy a színekvonal eltolódásáról beszélünk.

A zavaró hatások a színeképvonal eltolódásán kívül a vonalak kiszélesedését is okozzák. Az egyes fotonok egymástól kissé különböző frekvenciája eloszlásfüggvénnyel írható le. Ugyanez érvényes a hullámhosszra. Az interferencia-kép a hullámhossz eloszlása miatt annál inkább elhomályosodik, minél nagyobb az útkülönbség vagy a mérőszakasz hosszúsága. A sugárzás minőségét a hosszúságmérések tekintetében a *koherencia-hosszúság* jellemezi, ami az a legnagyobb útkülönbség, amelynél az interferencia még felismerhető.

A gázkisülési lámpák közül hullámhossz-etalonként csak kevés vehető számításba a  $10^{-6} \lambda$  nagyságrendű vonalkiszélesedések és a  $10^{-7} \lambda$  nagyságrendű vonaleltoadások miatt. 1960-ban még ismeretlen volt a lézertechnika, ezért hullámhosszetalonként a  $^{86}\text{Kr}$  nemesgáz, valamint a  $^{198}\text{Hg}$  és a  $^{114}\text{Cd}$  fémek jöhettek számításba. A választás végül is a  $^{86}\text{Kr}$ -ra, azaz a kripton nemesgáz 86-os tömegszámú izotópjára esett.

### **Az 1960. évi méterdefiníció**

A 11. Általános Súly-és Mértékügyi Értekezlet 1960-ban fogadta el a méter hullámhossz-definícióját, mely szerint *a méter a 86-os tömegszámú kripton atom  $2_{p10}$  és  $5_{d5}$  energiaszintjei közötti átmenetnek megfelelő, vákuumban terjedő sugárzás hullámhosszának  $1\,650\,763,73$ -szorososa*. A hullámhosszal definiált méter etalonjának megvalósítását az interferométer alkalmazása tette lehetővé.

Az egység atomi vagy fizikai állandók révén való meghatározása (definiálása), a hosszú idejű stabilitás garantálása mellett, önmagában véve, még nem biztosítja a gyakorlati megvalósítás magas színvonalát. A kripton 86 atomban végbemenő, adott átmenet energiájának megfelelő sugárzás hullámhossza például, amit a méter 1960-as definíciója foglal magába, stabil és nagy pontosságú, de megvalósításának pontosságát korlátozza a viszonylag nagy vonalszélesség, ami abból ered, hogy lehetetlen a nyugalmi állapotban levő, egyetlen kripton-atomból jövő sugárzást észlelni. Az ennek a definíciónak megfelelő méter újra-megvalósíthatósága (reprodukálhatósága) nem jobb, mint néhányszor  $10^{-9}$ . A jóval keskenyebb vonalszélességű lézer feltalálása és az optikai frekvenciamérési technikák ennek köszönhető tökéletesedése vezetett el a méter 1983-as definíciójához, ami közel három nagyságrenddel pontosabb, mint az 1960-a definíció alapján megvalósított legjobb érték.

Az energiaszinteknek a méter fenti meghatározásában szereplő jelölése a nemesgáz-színeképek spektroszkópiájában elfogadottnak felel meg. Az  $M = 1\,650\,763,73$  *hullámszám* a hullámhossz reciproka, azaz  $M = 1/\lambda$ , egysége az  $\text{m}^{-1}$ . Az  $M$  hullámszám és a  $\lambda$  hullámhossz szorzata kiadja az 1 métert, vagyis  $M \times \lambda = 1 \text{ m}$ . Az  $M$  számot úgy választották meg, hogy az így definiált méter a korábbi méterdefinícióval összhangban legyen, vagyis fennmaradjon a folytonosság.

A definícióban szereplő  $M = 1\,650\,763,73$  hullámszámhoz  $\lambda = 0,6057 \mu\text{m}$  hullámhossz tartozik, és az ennek megfelelő spektrumvonal a látható spektrum narancsvörös tartományában van. A hullámszámnak ez az értéke csak vákuumban való hullámterjedésre érvényes. Olyan átlátszó anyagokban, mint a gázok vagy az üveg, fénytörés lép fel. A beeső hullámnak az  $n$  törésmutató arányában rövidebb lesz a hullámhossza, mint vákuumban. A törésmutató, mint anyagjellemző, az anyag állapotától és a hullámhossztól is függ. Ez az oka annak, hogy a hullámhossz-etalonok közegeként csak a vákuum alkalmas. A  $^{86}\text{Kr}$  hullámhossz-etalonnal  $\pm 4 \cdot 10^{-9}$  bizonytalanságot lehet elérni.

## A lézertechnika alkalmazása a hosszúságmérésben

A lézer-effektus felfedezése (1960) forradalmasította a spektroszkópiát, azzal, hogy megteremtette a koherens sugárzások létrehozásának lehetőségét, és egyúttal módot adott a méteretalon korszerűsítésére.

A lézersugarak egy tükörpár között ide-oda verődő fényhullám-nyalábból keletkeznek, amely a nyalábot azonos fázisban felerősítő anyagon halad át. Ilyen „felerősítő” anyag például a hélium és a neon nemesgázok keveréke, amelyben gázkisülést lehet fenntartani. Egy lézersugár általában több diszkrét frekvenciát tartalmaz, de el lehet érni, hogy a sugárban csak egy stabilizált, azaz állandó és reprodukálható frekvencia legyen.

A stabilizálás egyik módszere, hogy a frekvenciát a jód ( $I_2$ ) egy abszorpciós vonalán tartják. A stabilizáláshoz olyan atomi rendszert kellett találni, amelyben a hullámhossz nem függ a működési körülményektől, például a lézercsőben levő nyomástól. A jód 129-es izotópjá bizonyult a legalkalmasabbnak. Ha az optikai rezonátorban a jód gőzeivel feltöltött gázcellát helyeznek el, akkor az a lézerfény működési frekvenciái közül bizonyosakat elnyel (abszorbeál). Ha a rezonátor hosszúságát az egyik ilyen abszorpciós vonalra szabályozzák be, akkor a hullámhossz újra-előállíthatósága ezerszeresére nő. A jódstabilizált hélium–neon lézer adta meg a kripton 86 gázkisüléssel a kegyelemdőfést.

A lézerek a frekvencia stabilitásán kívül más tulajdonságokban is megelőzik a klasszikus „normállámpákat”. Nagyságrendekkel nagyobb a koherenciahosszuk és kisebbek a vonaleltolódások. Az elektromágneses sugárzások spektrumának egyes tartományai korábban egymástól elszigeteltek voltak – gondoljunk a röntgensugarak, a látható fény és a rádióhullámok tartományaira – és az egyes tartományokban sajátos mérés-technika volt alkalmazható, a megfelelő mértékegységekkel. A méter és a másodperc SI alapegységek, definíciójuk hasonló jellegű, amennyiben mindkettő az atomon belül végbemenő, meghatározott energia-átmeneten alapul. A méter 1960-as definíciója a  $^{86}\text{Kr}$ -hoz, a másodperc 1967-es definíciója a  $^{133}\text{Cs}$ -hez kapcsolódik. A hozzájuk tartozó hullámot az egyik esetben egy hullámszám ( $1,65 \times 10^6 \text{ m}^{-1}$ ), a másik esetben egy frekvencia ( $9,19 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ ) jellemzi.

A méter és a másodperc két mértékegység-fixpontot határoz meg az elektromágneses sugárzások spektrumában. A lézertechnika lehetővé tette, hogy a lézerrel, mint frekvenciagenerátorral, a két fixpontot összekapcsolják. Ha két lézer sugarait egy tús kristálydiódára vezetik, akkor abban az egyik lézerfrekvencia és a másik lézerfrekvencia többszöröse közötti frekvenciakülönbség jöhet létre. Ezáltal meghatározható két lézersugárzás frekvencia-aránya. Több ilyen folyamat egymásra helyezésével, úgynevezett „frekvencia-mérőláncokban” a spektrális tartomány egészen a láthatóig végigkövethető. A két fixpont összekapcsolását először 1972-ben sikerült megvalósítani az Egyesült Államokban. Az eredmény többféleképpen értelmezhető: (1) a  $^{86}\text{Kr}$  energia átmenete frekvenciájának méréseként; (2) a  $^{133}\text{Cs}$  energia-átmenete hullámhosszának méréseként, és (3) a  $c$  fénysebesség vákuumban történő méréseként.

A Méterdefiníció Tanácsadó Bizottsága (a CCDDM) e mérések alapján 1973-ban a fénysebesség  $c = 299\,792\,458 \text{ m/s} \pm 4 \cdot 10^{-9} c$  értékének az elfogadását javasolta. Ez a megadott bizonytalanság arra enged következtetni, hogy nagyságát elsősorban a méter-definíció megvalósításának bizonytalansága szabta meg, mert a frekvencia-mérőlánc mérési bizonytalansága - és még inkább a másodperc-definíció megvalósításának mintegy  $\pm 10^{-14} \text{ s}$  bizonytalansága - jóval ez alatt van.



## Az 1983. évi terjedési idő definíció

A méter új definiálására vonatkozó első javaslat már a múlt század 60-as éveinek elején megszületett. Bay Zoltán javasolta, hogy a fény terjedési sebességének értékét rögzítsék, és így a hosszúság etalonjának pontosságát a sebesség = út/idő összefüggés alapján az időmérés pontossága fogja meghatározni. Ezt az elgondolást az 1972-ben az Egyesült Államokban elvégzett mérések eredményeire lehetett alapozni. Bay Zoltán kutatásai alapján megállapítható volt, hogy a fény terjedési sebessége legalább  $10^{-20}$  nagyságrendben állandó. A méter etalonja jelenleg ugyanolyan stabil, mint a legjobb időetalon.

1982 júniusában a Méterdefiníció Tanácsadó Bizottsága (CCDM) a méter új definícióját javasolta, mely szerint: „A méter annak az útszakasznak a hosszúsága, amelyet a fény vákuumban (1/299 792 458) másodperc alatt megtesz.” Ezzel a meghatározással a méter a másodperctől függővé válik ugyan, de továbbra is az SI egyik alapegysége marad. Mivel ez a meghatározás nem függ a másodperc definíciójának jellegétől, akkor is fenntartható, ha a másodperc definícióját a jövőben megváltoztatják.

Az új definíció elfogadásának két alapvető indoka volt. Az első indok technikai jellegű. A fejlődés során várható, hogy még jobb, még nagyobb stabilitású fényforrásokat lehet előállítani, és akkor ismét felmerül a kérdés, hogy a már elfogadott etalonnal kalibrálják-e az új fényforrást, vagy fordítva. Ma már működnek olyan stabilizált CO<sub>2</sub> lézerek, amelyek instabilitása mintegy  $10^{-12}$  -  $10^{-13}$  nagyságrendű. A második indok az a tartós igény, hogy az etalon fizikai állandóra legyen visszavezetve.

1983-ban született meg a méter máig is érvényes, a terjedési időre alapozott definíciója. Ha a másodperc definíciójából, mint jobban megvalósíthatóból indulunk ki, akkor a fénysebesség értékének rögzítésével a méter definiálható. A rögzített értékű fénysebesség fizikai állandó, amelynek értékét többé nem kell mérni. Az interferenciás hosszúságmérés technikai eszközei, a látható sugárzású stabilizált lézerek, rendelkezésre állnak. A jód egyik abszorpciós vonalára stabilizált He-Ne lézer instabilitása  $10^{-11}$ , koherencia-hossza kilométeres nagyságrendű, a színekvonalak kiszélesedése csekély mértékű. Az eszközzel nemcsak a métert, hanem annak többszöröseit is elő lehet állítani. Megoldódott tehát a megfelelő monokromatikus fényforrás problémája.

A méter új definícióját mégsem erre az eszközre, hanem a hosszúságmérés terén alkalmazott új mérési elvre, a *terjedési idő mérésére* alapozták. A Földön kívüli méréseknél, például az űrkutatásban, a földi atmoszféra hatása által okozott mérési bizonytalanság a távolság függvényében csökken.

A Michelson-féle interferométer működése, mint láttuk, a csíkszámolás elvén alapul, amelynél a T<sub>2</sub> tükröt mozgatják. Amíg a tükör mozog, addig az észlelés helyén, periodikusan, vörös és sötét csíkok váltják egymást. A tükör mozgásának ideje alatt megszámlált vörös és sötét csíkok összegét a  $\lambda/2$  fél-hullámhosszal megszorozva adódik az L elmozdulás. Ezzel az elrendezéssel a fél-hullámhossznak megfelelő,  $\lambda/2 = 0,3165 \mu\text{m}$  osztásértékű skálát lehet előállítani. Tekintettel azonban arra, hogy az interferométer elektronikus érzékelője előtt elhaladó csíkok szélessége egyenesen arányos a tükör mozgásának sebességével, időosztásos interpolációval az osztásérték a felére,  $\lambda/4 = 0,1582 \mu\text{m}$ -re csökkenthető.

Ebben az interferométerben a  $T_2$  tükör úgynevezett „saroktükör”, amely a beeső fényt önmagával párhuzamosan veri vissza, így biztosítva azt, hogy a visszavert fény mindig az interferenciás lemezre essen.

A Doppler-elv alapján működő interferométer, lényegében véve, ugyancsak Michelson-féle interferométer, amely külső felépítését tekintve semmiben sem tér el a csíkszámolásos interferométertől. Ebben is megtalálható a  $T_1$  és  $T_2$  saroktükör és az interferenciás lemez. Ez az elrendezés a Zeemann-effektust hasznosítja.

A Zeemann effektus abban áll, hogy ha a fényt kibocsátó atomok külső mágneses térben helyezkednek el, akkor a színeképvonalak felhasadnak. Ha az így felbontott színeképvonal sugárzását az alkalmazott mágneses térrel párhuzamos irányból figyelik meg, akkor a két fényösszetevő egyike jobbra cirkulárisan polarizált lesz, és frekvenciája elcsúszik a kisebb értékek irányába, a másik összetevő pedig balra cirkulárisan polarizált lesz, és frekvenciája a magasabb értékek felé csúszik el. Ha változik a rezonátor hosszúsága, akkor a két összetevő relatív intenzitása is megváltozik, és a két frekvencia között 2 MHz különbség lép fel.

A mozgó saroktükörrre beeső,  $F_2$  frekvenciájú fény frekvenciája a mozgatás sebességétől függően  $\Delta F$  frekvenciával megváltozik. Ha a saroktükör közeledik az interferenciás lemezhez, akkor a  $\Delta F$  frekvencia hozzáadódik az  $F_2$  frekvenciához, ha pedig távolodik tőle, akkor levonódik. A  $\Delta F$  frekvenciakülönbség a következő összefüggésből kapható:

$$\Delta F = F_2 \cdot 2v/c$$

ahol  $v$  – a tükör mozgatási sebessége  
 $c$  – a fény terjedési sebessége az adott közegben.

A saroktükörről visszaverődő fény az  $F_1$  frekvenciájú fényel találkozáva fénylebegéses interferenciát hoz létre a lézerfejben, és ennek következtében az érzékelő kimenetén a  $2 \text{ MHz} \pm \Delta F$  frekvencia jelenik meg. A berendezés tehát voltaképpen a saroktükör sebességét méri, és az elmozdulást az

$$L = \int_0^t v dt$$

összefüggés adja meg. Az integrálást maga a berendezés végzi el. A berendezés felbontása  $\lambda/60 = 0,01 \mu\text{m}$ .

A különböző elven működő és különféle felépítésű lézerekkel végzett mérések bizonytalansága azonos nagyságrendben van, mintegy  $0,2 - 0,7 \mu\text{m}$ . Ez azzal magyarázható, hogy a működési elv ugyan meghatározza a mérési bizonytalanságukat, de a befolyásoló mennyiségek hatása közel azonos, és ez kiegyenlíti a különbségeket.

### **A méterdefiníció megvalósításának további fejlődése**

A CIPM 1992-ben és 1997-ben felülvizsgálta a méter definíciójának gyakorlati megvalósítását, figyelembe véve, hogy a tudomány és a technológia továbbra is igényli a hosszúság-egység etalonja pontosságának növelését. 2002. évi 1. Ajánlásában megállapította, hogy 1997 óta a nemzeti laboratóriumokban, a BIPM-ben és másutt a méter-

megvalósításokhoz új sugárzókat és módszereket ismertek fel, ami alacsonyabb bizonytalanságot eredményezett. A gyakorlati megvalósítás ajánlott sugárzásainak alkalmazási területe mindinkább kiszélesedett, úgyhogy nem csak a hosszúságmérések metrológiáját és a méter megvalósítását fedte le, hanem a nagy felbontású spektroszkópiát, az atom- és molekuláris fizikát, a fizikai állandókat és a távközlést is.

A CIPM 2002-ben ismételten felülvizsgálta a méterdefiníció gyakorlati megvalósítására vonatkozó korábbi ajánlásokat. Erre 1983-ban a 17. Általános Súly- és Mértékügyi Értekezlet kérte fel, miután elfogadta a méter új definícióját. A CIPM a felkérésnek megfelelően utasításokat/eljárásokat dolgozott ki a méter gyakorlati megvalósítására. Hullámhossz-etalonként alkalmazható sugárzásokat választott ki az interferometriás hosszúságmérésekhez és utasításokat fogalmazott meg azok alkalmazására.

A CIPM elfogadta a CGPM ajánlását a méter gyakorlati megvalósítására, mely szerint a métert a következő módszerek egyikével kell megvalósítani:

- (a) egy elektromágneses síkhullám  $t$  idő alatt vákuumban befutott  $l$  távolságának a mérése útján: ez a távolság a  $t$  mért időből adódik, az  $l = c_0 t$ , összefüggésből, és a fény terjedési sebessége vákuumban  $c_0 = 299\,792\,458$  m/s.
- (b) az  $f$  frekvenciájú síkhullám  $\lambda$  hullámhosszának vákuumban való mérése útján: ez a hullámhossz a mért frekvenciából adódik, a  $\lambda = c_0/f$  összefüggés alapján, és a fény terjedési sebessége vákuumban  $c_0 = 299\,792\,458$  m/s.
- (c) a CIPM által ajánlott listában felsorolt sugárzások valamelyikének a segítségével, amelyeknek a vákuumban megállapított hullámhossza vagy a megállapított frekvenciája a bemutatott bizonytalansággal használható, feltéve, hogy az adott előírásokat és az elfogadott helyes gyakorlatot követik.

A CIPM 2003-ban és 2005-ben további frissítéseket végzett az ajánlásokban, amelyek az érdeklődők számára a BIPM honlapján [www.bipm.org/en/publications/mep.html](http://www.bipm.org/en/publications/mep.html) címen elérhetők.

## Összefoglalás

A mai méterdefiníció kikristályosodásához a méter 1889-es meghatározásától az 1983-as meghatározásáig közel száz évre volt szükség. Azzal, hogy a méter definíciója magába foglalja a fénysebesség  $299\,792\,458$  m/s értékét, a méter az elektromágneses sugárzás bármely olyan forrásával megvalósítható, amelynek a frekvenciája ismert vagy mérhető. A CIPM kiválasztott egy sor olyan atomi és molekuláris átmenetet, amelyeknek megadott hullámhossza és frekvenciája van, és amelyek alkalmasak a lézersugarak stabilizálására. Az ilyen lézersugarak frekvenciájának az újra-előállíthatósága (reprodukálhatósága) jobb, mint az a pontosság, amellyel a cézium frekvencia-etalonok értéke ismert. A jódstabilizált, 6,33 nm körüli hullámhosszú hélium-neon lézereknek a BIPM-ben elvégzett nemzetközi összehasonlításai azt jelzik, hogy néhányszor  $10^{-11}$  relatív mérési bizonytalanság érhető el. A stabilizálási technikák gyorsan fejlődnek, és ettől a reprodukálhatóság további javulása várható. B.L.

## Köszönetnyilvánítás

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