

Az új SI megvalósítása

Realization of the new SI

Szűcs László, Nagyné Szilágyi Zsófia

Budapest Főváros Kormányhivatala, Metrológiai és Műszaki Felügyeleti Főosztály

szucs.laszlo@bfkh.gov.hu, nagyne.szilagyi.zsofia@bfkh.gov.hu

Összefoglalás — 2019. május 20-a óta megváltozott a SI (International System of Units) alaplémértékegységeinek definíciója. Az új meghatározások egyes mértékegységeknél csak megfogalmazásban különböznek a régítől, másoknál az előzőtől alapvetően eltérő fizikai elvek kerültek előtérbe. A cél egy invariáns, alapvető természeti állandókon nyugvó mértékegységrendszer megalkotása volt. Az új definíciókat számos publikáció tárgyalta, a jelen összefoglaló az új definíciók gyakorlatban történő megvalósításának bemutatását tűzte ki céljául.

Kulcsszavak: SI, megvalósítás, másodperc, méter, kilogramm, kelvin, amper, mól, kandela, etalon,

Abstract — The definition of the base units of the SI (International System of Units) has changed since May 20, 2019. The new definitions differ from the old ones only in wording for some units, while for others, fundamentally different physical principles have come to the fore. The goal was to create an invariant system of units based on fundamental natural constants. The new definitions have been discussed in numerous publications, and this summary aims to review the implement the new definitions in practice.

Keywords: SI, realization, second, metre, kilogram, kelvin, ampere, mole, candela, Kibble balance, Watt balance, IPK, standard

1 BEVEZETÉS

2018. november 16-án Versailles-ban a világ nemzeti metrológiai intézeteinek képviselői szavaztak és döntöttek a Nemzetközi Mértékegységrendszer (SI) megújításáról. Az új definíciók 2019. május 20-án, a Metrológiai Világnapon (egyben a Méteregyezmény létrejöttének évfordulóján) léptek életbe.

A megújult definíciókat számos publikáció tartalmazza, metrológiai szempontból a BIPM SI – BROCHURE 9. [1] kiadása mérvadó (a legutolsó verzió 2024-ben került kiadásra). Magyarországi bevezetését kormányrendelet írta elő [2].

1.1 Az SI evolúciója

Az SI mértékegységrendszer létrehozásáról a Méteregyezmény legfelsőbb döntéshozó testülete, a General Conference on Weights and Measures (CGPM) 11. ülése döntött 1960-ban. A cél egy koherens és egységes rendszer létrehozása volt, 6 alaplémértékegység definiálásával. A definiált mértékegységek a méter, a kilogramm, a másodperc, az amper, a kelvin és a kandela voltak. 1971-ben a 14. CGPM ülés határozata az alapegységek közé sorolta a mól is, hétre bővítve az alaplémértékegységek számát.

Az 1960-as SI alapdefiníciók között a méter alapja már nem az 1889-es fizikailag létező platina-irídium „ösméterrúd” volt, hanem a ⁸⁶Kr-atom két elektrópályája közötti átmenet hullámhosszának a többszöröse. Gyakorlatilag csak a tömeg etalonja, az *International Prototype of the Kilogram* (IPK) maradt az egyetlen mesterségesen létrehozott műtárgy (a már említett platina-irídium).

A tudomány és technika fejlődése során az alaplémértékegységek definíciója és azok megvalósítását jelentő etalonok egyre inkább a mikrovilág és a kvantumeffektusok alkalmazása felé tolódott. Az új definíciók már kvantumeffektusokon alapulnak (a kandela kivételével).

Az új SI definíció számos változtatást hozott az előző rendszerhez képest:

- Nincs többé mesterséges műtárgy, amely egy adott mértékegységet megvalósítana (az utolsó az IPK volt).
- Minden mértékegység egy invariáns természeti állandóhoz lett csatolva (a kandela kivételével). Ez azt jelenti, hogy a következő években ezen természeti állandók értékei változatlanok lesznek, bizonytalanság nélkül! A fixált állandók értékei addig maradnak változatlanok, amíg a technika fejlődése nem indokolja, hogy egy, a mainál pontosabb érték cserélje fel a definícióban megadott adatokat.
- A mértékegység definíciók a Föld tetszőleges pontján bármikor és bárki által megvalósítható.
- A megvalósítás technikai kivitelezésére (fizikai háttér) több módszer is lehetséges, egyedül a másodperc az, ami kimondottan egy atomhoz, a ¹³³Cs-hoz van kapcsolva.
- A mértékegységek értékének megvalósítása széles skálán változik és nem egy számértékhez köthető (mint pl. korábban csak a víz hármaspontja).
- Megváltozott a mértékegységek egymás közti hierarchiája. Az elsődleges a másodperc, amely a legkisebb bizonytalansággal valósítható meg.
- Az eddig csak technikai mértékegységként kezelt mól önálló, valódi mértékegységgé vált.

A következő fejezetekben a teljesség igénye nélkül kerülnek bemutatásra a megvalósítási lehetőségek.

2 A MÁSODPERC

A másodperc hivatalos definícióját az [1] adja meg, a magyar honosított verziót a 127/1991. (X.9.) Korm. rendelet [2] 1. melléklete tartalmazza: „Az idő mértékegysége a másodperc; jele: s. Definíció szerint a

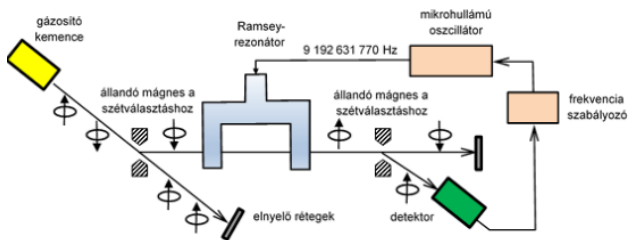
cézium-133 atom $\Delta\nu_{Cs}$ perturbálatlan alapállapotú hiperfinom átmeneti frekvenciájának rögzített számértéke legyen $9\,192\,631\,770$, amely Hz egységben van kifejezve, ami megegyezik a s^{-1} -nel”.

A definíció alapvetően nem változott a CGPM 13. ülésén megfogalmazottól (1967) [3], csupán a megfogalmazás egyszerűsítése miatt került átdolgozásra. A mértékegység megvalósítása egy evolúciós folyamaton ment át, noha a ^{133}Cs atomhoz való csatolás a mai napig megmaradt.

2.1 Az atomóra

A mértékegység megvalósítása az ún. „atomóra”, amelynek működése a Stern–Gerlach-effektuson [4] alapszik. A ^{133}Cs atom legkülső elektronhéján csak egy elektron van. Ennek az elektronnak a spinje határozza meg az atom mágneses momentumát. Mint a kvantummechanikából ismert, ennek két állapota lehetséges, amelyek közötti átmeneti frekvencia $9\,192\,631\,770$ Hz. Egy gázosító kemencéből a céziumatomnyaláb egy inhomogén mágneses téren halad keresztül, a külső elektronjuk pillanatnyi spinjétől függően két nyalábra válik szét.

Az eltérített nyaláb atomjai egy mikrohullámú rezonátoron (Ramsey-rezonátor) haladnak keresztül, amelyben egy mikrohullámú generátor az átmeneti frekvencián (annak közelében) szabályozható frekvenciájú elektromágneses sugárzást tart fenn. Rezonancia esetén az atomok külső elektronjának spinállapota megváltozik (átbillen). Az atomnyaláb egy újabb inhomogén mágneses téren való áthaladásakor ismét két részre válik. A spinorientációt megváltoztatott atomokat egy detektor érzékeli. Ha a nyaláb intenzitása csökken, a vezérlőegység megváltoztatja a rezonátorban lévő elektromágneses sugárzás frekvenciáját úgy, hogy a nyaláb intenzitása a maximum legyen (negatív visszacsatolás). Ez a frekvencia (Hz-ben megadva) a másodperc alapja [5]. A fenti folyamatot szemlélteti az 1. ábra.



1. ábra: Az atomóra sematikus vázlata

A világ első céziumrezonancián alapuló atomóráját, etalonját Louis Essen és társai helyezték üzembe a National Physical Laboratoryban, Teddingtonban, 1955 júniusában [6]. A céziumrezonancia sáv szélessége 340 Hz volt, ami 10^{-9} pontosságot tett lehetővé. Az atomórák számos nemzeti metrológiai intézetben megtalálhatók, kereskedelmi forgalomban megvásárolhatók. Közülük a legpontosabbak (speciális kialakításúak) elérik az $5 \cdot 10^{-15}$ pontosságot [7], bár a spinállapot-kiválasztó mágneseket már lézerek helyettesítik. Ehhez a pontossághoz 62 Hz-es rezonancia-sáv szélesség tartozik.

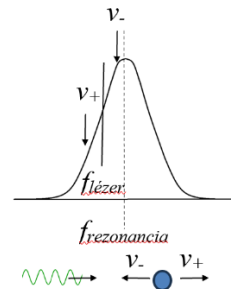
2.2 A „Cesium Fountain” frekvenciaetalonok

Zacharias már az 1950-es években javasolt egy olyan új elrendezést, amikor a céziumnyaláb függőleges irányba hagyná el a gázosító kemencét, áthaladna a mikrohullámú

rezonátoron (csak egy ág), azután a gravitáció hatására lelassulna, megállna, majd visszafelé estében haladna át ismét a rezonátoron. Ez az elrendezés csak a viszonylag kis kezdősebességgel rendelkező atomok esetében működik, a lassú atomokat a jóval nagyobb sebességű atomok kiszorítják a nyalábból (a céziumatomok átlagsebessége szobahőmérsékleten kb. 130 m/s), így akkor ez a berendezés nem működött. Forradalmi változás akkor következett be, amikor 1975-ben Dave Wineland és társai, valamint T. W. Hänsch kidolgozták az atomok lézeres hűtésének elvét [8][9]. Az elméleti háttérrel számos irodalom olvasható [10].

2.2.1 A lézeres hűtés elve

A lézeres hűtés a Doppler-effektuson alapszik. Egy gázatom elektronhéjának gerjesztése a két elektronnívó közti energiakülönbségnek megfelelő lézergyárással lehetséges. Ha a lézergyár frekvenciája megfelelő, az atomokkal való kölcsönhatás során az atomok elnyelik a fotonokat, majd legerjesztődnek és az átmenetnek megfelelő energiájú foton kibocsátják.



2. ábra: Doppler-effektus foton atomon történő szórásánál

Az egyszerűség kedvéért egydimenziós esetet feltételezve, a 2. ábra alsó részén látható a lézernyalábot jelképező hullámalak, amellyel szemben, vagy vele egy irányban mozog egy gázatom. A lézer frekvenciája az atom valamely rezonanciafrekvenciája alá van hangolva, önmagában kis valószínűséggel gerjeszti az atomot. A vele szemben mozgó (v_-) atom számára a Doppler-effektus miatt a lézer frekvenciája magasabbnak látszik. Ekkor nagy valószínűséggel az atom elnyeli a foton és felgerjesztődik. Mivel szemben mentek, az impulzusmegmaradás miatt az atom sebessége csökkenni fog. A lézer irányában haladó atom (v_+) számára a Doppler-effektus miatt a foton frekvenciája még továbbra kerül a rezonanciától.

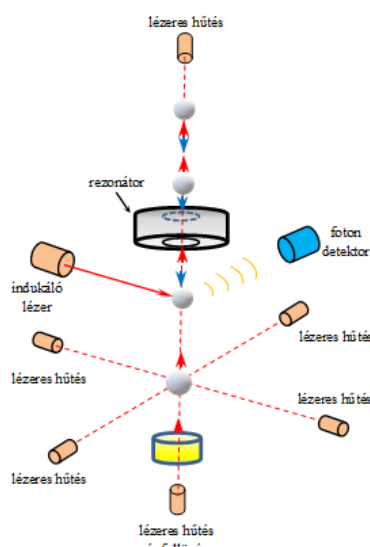
A gerjesztett atom fotonkibocsátással kerül alapállapotba. A foton kibocsátásának iránya véletlenszerű, legrosszabb esetben a lézer irányában történik, ekkor visszakapja eredeti sebességét. Minden más esetben a lézer irányára eső sebességkomponens csökkenni fog. A sebességcsökkenés átlagos mértéke 6 cm/s [9], de a folyamat ismétlődik, így jelentős sebességcsökkenés érhető el rövid idő alatt. A gyakorlatban három pár lézernyalábot alkalmaznak, a páronként kijelölt egyenesek egymásra merőlegesek.

2.2.2 A cézium fountain megvalósítása

Az új típusú atomóra az ún. cézium fountain (a céziumatomok nyomvonalának szökőkútira emlékeztető volta miatt). A gázosító kemencét elhagyva a céziumatomok hat, egymással derékszögben lévő lézeres hűtő rendszerbe kerülnek, amelyek frekvenciája enyhén az atomok optikai rezonanciaátmenete alatt van, hogy a Doppler-hatás érvényesülni tudjon. A céziumatomok

néhány száz ms alatt mintegy $1 \mu\text{K}$ (vagy az alá) hűlnek, és kis „golyókat” alakítanak ki. Ekkor a sebességük megközelítőleg 1 cm/s lesz. A céziumatomok által alkotott „golyókat” a függőleges lézer enyhén meglöki, hogy azok felfelé mozogjanak, egyben a lézerek lekapcsolódnak. A felfelé mozgó atomcsomag keresztülhalad egy mikrohullámú rezonátoron, ami az atomokat gerjeszti. Az atomcsomag kb. 1 méter utat megtéve megáll, majd visszafordul a gravitáció hatására, majd ismét átmegy ugyanazon a rezonátoron. A rezonátort elhagyva egy lézernyalábbal átvilágításra kerül, indukált fotonemissziót létrehozva azoknál az atomoknál, amelyek a rezonátorban gerjesztett állapotba kerültek. A kibocsátott fotonok intenzitását egy detektor méri. Ez a folyamat sokszor ismétlődik, kissé változtatott mikrohullámú frekvencia mellett. Amely frekvenciánál a mért fotonintenzitás a legmagasabb, az a keresett rezonanciafrekvencia [11].

A *cézium fountain* sematikus elrendezését szemlélteti a 3. ábra.



3. ábra: A *cézium fountain* sematikus elrendezése

A *cézium fountain* pontossága 10^{-16} nagyságrendbe esik (30 millió év alatt 1 másodperc tévedés). Az SI alapegységei közül a másodperc az, amelynek a megvalósítása a legpontosabb.

2.3 Az optikai órák, a jövő kronométere

Bár az idő mérése a *cézium fountain* létrehozásával rendkívül pontosan megvalósítható, mégis várhatóan 2030-at követően a másodperc definíciója meg fog változni, köszönhetően a tudomány és technika gyors fejlődésének. A változást a már napjainkban is megvalósított ún. optikai órák megjelenése indokolja.

Az atomórák és a *cézium fountain*-ek az atomhék olyan átmeneteit használják ki, amelyek frekvenciája az elektromágneses skálán a látható fény frekvenciája alatt van. Az optikai órák működésének alapja, hogy a látható fény tartományába eső átmeneteket alkalmaznak. A megvalósításuknak két lehetséges változata van.

2.3.1 Az optikai órák megvalósítása csapdázott ionokkal

Az első lépés egy ion létrehozása elektronok eltávolításával vagy hozzáadásával. Az ionokat aztán elektromágneses mezővel csapdába zárják (4. ábra).

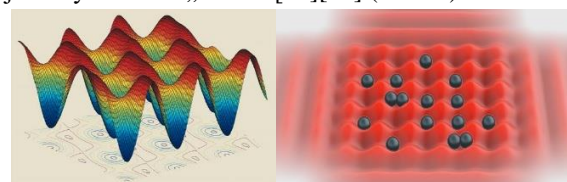


4. ábra: Elektromágnesesen csapdázott ion

A csapdába zárást követően lézeres hűtés következik, majd az optikai tartományba eső lézernyalábbal sugározzák be, folyamatosan változtatva a lézer frekvenciáját. A besugárzás során mérik az abszorpció mértékét. Ahol a legnagyobb, ott van az ion rezonanciafrekvenciája. Ezen a frekvencián gerjesztve mérhető a legerjesztődéskor kilépő foton, melynek frekvencia-sávszélessége sokkal kisebb, mint a *cézium fountain* sávszélessége, ezért annál jóval pontosabb. Erre a célra elsőként az alumíniumiont alkalmazták.

2.3.2 Az optikai órák megvalósítása optikai rács segítségével

Az optikai rács segítségével létrehozott „órák” működési elve hasonló a csapdázott ionokkal megvalósított elvhez, azonban egyszerre több ion rezonanciája valósul meg. Két egymásra merőleges, egy síkban sugárzó lézernyaláb segítségével olyan periodikus elektromágneses tér jön létre, amely hasonlít a „tojástartóhoz”, amelyben tojás helyett ionok „ülnek” [12][13] (5. ábra).



5. ábra: Optikai ráccsal létrehozott ioncsapdák

A csapdába esett ionok lézeres hűtést, majd együttes besugárzást követően együtt érik el a rezonanciaállapotot, így erősebb, megbízhatóbb rezonáns sugárzást hoznak létre.

3 A MÉTER

Hivatkozva az [1] és [2] irodalmakra, a méter definíciója: „A hosszúság mértékegysége a méter; jele: m. Definíció szerint a vákuumbeli fénysebesség (c) rögzített számértéke legyen $299\,792\,458$, amely m/s egységben van kifejezve, ahol a másodpercet $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ határozza meg.”

Az első CGPM ülés 1889-ben meghatározta az alap mértékegységek definícióit [14]. A méter egy platina (10 % irídiummal ötvözve) rúdon lévő két karcolás közti távolság a jég olvadáspontjának a hőmérsékletén. Az SI bevezetésekor, 1960-ban már a ^{86}Kr -atom két elektronpályája közti átmenet ($2p^{10} \rightarrow 5d^5$) hullámhosszának $1650763,73$ -szereseként lett meghatározva. Azonban viszonylag hamar nyilvánvalóvá vált, hogy a megvalósítása közben az etalonok stabilitása nem volt megfelelő.

1965-ben Bay Zoltán már javasolta, hogy a méter a fénysebességhez legyen csatolva. A 17. CGPM 1. számú határozata [15] (1983) szerint a méter a fény által vákuumban 1 másodperc alatt megtett távolságának $1/299792458$ része. Ez a definíció a 2019-ben elfogadott mértékegységrendszerben sem változott, csupán a megfogalmazás lett egységes a másik 6 mértékegységgel.

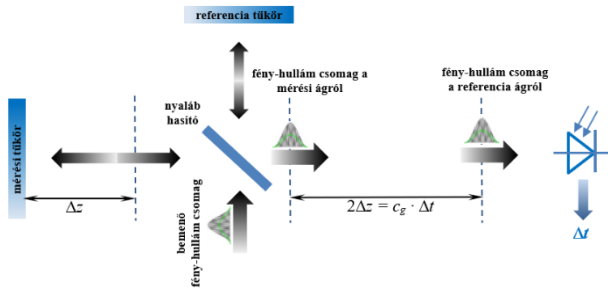
A méter megvalósítására primer és másodlagos etalonokkal is van lehetőség.

3.1 A méter megvalósítása primer etalonokkal

A méter primer etalonokkal történő megvalósítása két úton lehetséges: közvetlen és közvetett mérési elvekkel.

3.1.1 A méter primer megvalósítása közvetlen méréssel

A primer megvalósítás sematikus elrendezését a 6. ábra szemlélteti.



6. ábra: A méter megvalósításának fényimpulzusokkal történő megvalósításának sematikus elrendezése

Egy modulációval létrehozott fényimpulzus a központi (félgáteresztő) tükrön két, egymásra merőleges impulzussá válik szét. Az egyik impulzus egy „referencia” tükrőről visszaverődve visszatér a központi tükrőhöz, majd onnan visszaverődik és tart a fotodetektor felé (fényhullámcsomag a referenciaágról). A hasított másik impulzus a „mérési” ágra kerül, amely Δz távolsággal hosszabb, mint a referenciatükrőhöz vezető szakasz. A „mérési” tükrőről visszaverődve, majd a központi tükrön áthaladva egy második hullámcsomagot alkot (fényhullámcsomag a mérési ágról) [16] [1].

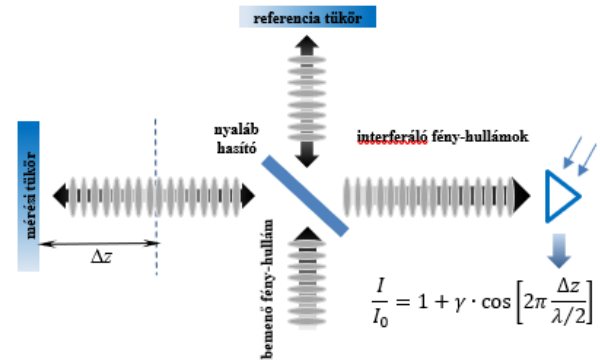
A referencia és a mérési ág l útkülönbsége kifejezhető:

$$l = \Delta z = 1/2 c_g \cdot \Delta t \quad (1)$$

ahol Δt a két fényimpulzus detektálása között eltelt idő, c_g pedig a fényhullám csoportsebessége. Vákuumban c_g megegyezik a c fénysebességgel, levegőben azonban függ annak törésmutatójától. A látható fény esetében ez $2,8 \cdot 10^{-4}$ nagyságrendbe esik. A távolság pontos méréséhez a közeg törésmutatójának ismerete is alapvető szempont. Rövid távolságok mérése ezzel a módszerrel kevésbé pontos, mert az elektronika időfelbontása is számottevő bizonytalanságot okozhat. $l=1$ m esetében a fényimpulzusok közti időtartam (Δt) ~ 6 ns. A Hold–Föld távolság mérésénél a referenciatávolság elhanyagolható és a vákuum miatt c_g egyszerűen c -vel helyettesíthető az (1) kifejezésben.

3.1.2 A méter primer megvalósítása közvetett méréssel

Néhányméteres távolságok meghatározására a legalkalmasabb eszközök az interferométerek, amelyek működése a fény interferenciáján alapulnak. A megvalósítási elrendezés hasonló a fényimpulzus időkülönbség-mérésnél alkalmazottal, sematikus elrendezését a 7. ábra szemlélteti [1][16].



7. ábra: A méter megvalósításának interferométerrel való megvalósításának sematikus elrendezése

A bemenő fénynyaláb a félgáteresztő tükrön két részre van osztva. A referencia- és a mérőtükrökről visszavert fénynyaláb interferenciájának intenzitását a fotodióda méri. A fotodiódán megjelenő intenzitás (I/I_0) függ a Δz értékétől és a fény hullámhosszától. A kifejezésben található γ értéke ([1] Appendix 2. csak elektronikusán):

$$\gamma = 2 \cdot \sqrt{I_1 \cdot I_2} / (I_1 + I_2), \quad (2)$$

ahol $I_0 = I_1 + I_2$.

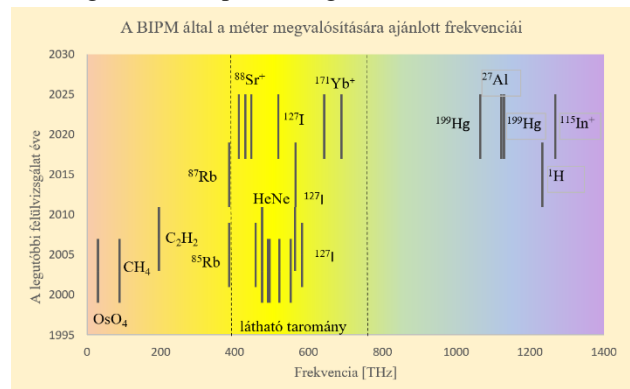
A legegyszerűbb esetben a távolság méréséhez a mérési tükröt kell a fénynyaláb útja mentén mozgatni, és meg kell számolni az intenzitásmaximumokat. Az intenzitásmaximumok számából és a fény hullámhosszából meghatározható a mozgatott tükrő által megtett távolság.

Az interferenciás megvalósításnál nagyon lényeges az alkalmazott fény hullámhosszának nagyon pontos ismerete. A BIPM hosszúság- (CCL) és idő-frekvencia (CCTF) tanácsadó bizottságainak közös munkacsoportja (WGFS) publikálja azokat a frekvenciákat, amelyekkel a méter megvalósítása interferenciás módszerrel meghatározható [17]. A BIPM honlapján jelenleg (2025) 29 ajánlott frekvencia található meg.

Kiemelendő, hogy a primer megvalósítást kitűző intézetek széles körben megválaszthatják a számukra kedvező frekvenciát, valamint magát a megvalósítandó távolságot is. Néhány frekvenciát (a létrehozó atommal vagy molekulával együtt) a 8. ábra jelenít meg.

3.2 A méter megvalósítása másodlagos módszerekkel

A méter primer etalonokkal történő megvalósítása a távolság makroszkopikus világában történik.



8. ábra: A BIPM által ajánlott frekvenciák a méter primer megvalósítására

A mai gyakori nanométeres technológiai eljárások olyan rövid távolságok esetén igénylik a visszavezetettséget, amelyet a primer módszerekkel már nem lehet biztosítani.

A félvezetőgyártás alapanyaga a szilícium, ezért a tulajdonságainak kutatása régóta a középpontban van. Különösen az SI 2019-es revíziójához vezető úton, hiszen sokáig jelölt volt a kilogramm megvalósításának versenyében. A Si {220} rácsterkeztű, tiszta egykristály, rácsláncja a CODATA (Committee on Data of the International Science Council) 2022-es adatbázisa (amely hozzáférhető [18]) szerint: $d_{222}: 1,920155716 \cdot 10^{-10}$ méter, relatív standard bizonytalansága $1,6 \cdot 10^{-8}$, $22,5 \text{ }^\circ\text{C}$ hőmérsékleten, vákuumban.

A BIPM CCL nanotechnológiai munkacsoportjának ajánlása alapján: a Si {220} rácslánc használható, mint a méter definíciójának másodlagos megvalósítása. Három példa a szilícium rácson keresztüli visszavezettség alkalmazására a nanométerek világában:

- Az elmozdulás mérése a Si {220} rácslánc síkjához képest röntgensugaras interferométerrel [19],
- Transzmissziós elektronmikroszkóp (TEM) kalibrációja [20]
- Rácslépcsők lépésmagasság-mérésének visszavezetettsége [21]

4 A KILOGRAMM

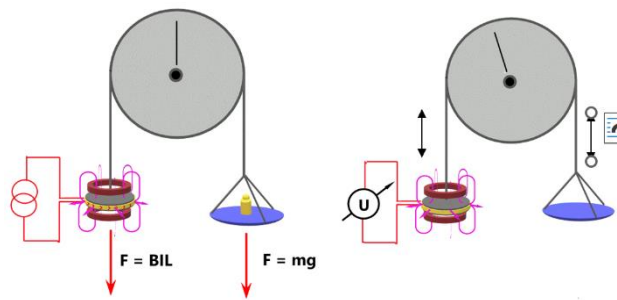
2019-ig a tömeg etalonja volt a legutolsó műtárgy, amely az SI mértékegységrendszer definícióiban szerepelt, mint az egység megvalósítása. Ez volt az International Prototype of the Kilogram (IPK, 9. ábra).



9. ábra: A tömeg etalonja 2019-ig

A CGPM 2019-ben úgy döntött, hogy az összes többi SI mértékegység definícióhoz hasonlóan (kivéve a kandela) a tömeg mértékegységét is invariáns természeti állandóhoz köti. Ez volt az SI „forradalom” legnagyobb újdonsága. Az új definíció [2]: „A tömeg mértékegysége a kilogramm; jele: kg. Definíció szerint a Planck-állandó (h) rögzített számértéke legyen $6,62607015 \cdot 10^{-34}$, amely J·s egységben van kifejezve, ami megegyezik a $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ -nel, ahol a métert és a másodpercet c , illetve $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ határozza meg.”

A megvalósítás talán a legbonyolultabb az összes mértékegység közül. A definícióváltásra való felkészülés hosszú évek munkája volt, amelynek során két megvalósítás versenyzett egymással. Az egyik az ún. „Watt balance”, a másik pedig a „Si-gömb” elgondolás. A Watt balance (mai elnevezéssel Kibble balance) kisebb bizonytalansággal valósította meg a tömegetalon értékét, így ez a megfogalmazás, és vele együtt a Planck-állandó került az új SI-definíciók közé. A megvalósítás az eredeti megoldásokban két lépcsőben történt, manapság ezt egy lépésben teszik. Az alapelv a következő [23][24][28]:



10. ábra: A Kibble-balance működési elve

Az első lépésben (10. ábra bal oldal) a meghatározandó tömeg a „csiga” egyik serpenyőjében helyezkedik el, az „ellensúly” egy elektromágnes tekercsben lévő mágnes. A tekercsben folyó áram akkora, hogy egyensúlyt tart a meghatározandó tömeg által kifejtett nehézségi erővel, azaz:

$$BIL = mg \quad (3)$$

ahol B a mágneses indukció, I az áramerősség, L a tekercs menetszáma, m a meghatározandó tömeg és g a lokális gravitációs állandó.

Második lépésben a mágnes v sebességgel mozog ugyanabban a tekercsben, ezzel U feszültséget indukál.

$$BLv = U \quad (4)$$

A (3) és (4) egyenletekből:

$$m = (g \cdot v)^{-1} \cdot U \cdot I \quad (5)$$

Az U feszültséget a Josephson-etalonról lehet lezámaztatni, az I áramerősség pedig a Hall-effektus segítségével határozható meg. Az m tömeget meghatározó kifejezés:

$$m = N \cdot K_J^2 \cdot (4 \cdot g \cdot v)^{-1} \cdot h \quad (6)$$

ahol K_J a Josephson-állandó ($\sim 484 \text{ GHz/mV}$), h a Planck-állandó és N egy, a megvalósítás során alkalmazott állandók reprezentánsa. A gyakorlati megvalósítás nagyon pontos és technikailag magasszintű munkát igényel [22][23][24].

4.1 A Josephson-etalon

A Josephson-effektus két szupravezető közt lévő szigetelőréteg elrendezésben jön létre. Ekkor, ha a szigetelő külső mikrohullámú sugárzás alatt van, a szupravezetők közt ún. Cooper-párok segítségével áram jön létre, feszültség felléptével (11. ábra) [25]



11. ábra: A Josephson-etalon sematikus ábrája

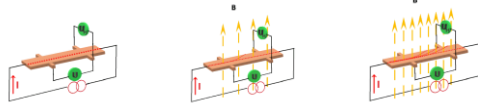
A feszültség nagysága függ a mikrohullámú sugárzás frekvenciájától:

$$V_n = n \cdot \frac{h}{2e} \cdot f \quad (7)$$

ahol n egy egész szám. A $2e/h$ konstans értékét K_J Josephson-állandónak hívják, értéke $483\,597,9 \text{ GHz/V}$. A PTB feszültségetalonja több tízezer Josephson-cellát tartalmaz sorba kapcsolva, így 10 V nagyságú etalon feszültség is elérhető [26].

4.2 A Hall-effektus

Ha egy vezetőben U feszültség hatására I áram folyik, a vezető két oldala közt nincs feszültségkülönbség. Ha a vezető B indukciójú mágneses térben van, az elektronok eltérülnek, és a két oldal közt feszültség alakul ki (12. ábra)



12. ábra: Hall-effektus. Külső mágneses térben az áramjárta vezető két oldala között feszültség alakul ki

A vezető két oldala közötti Hall-feszültség arányos a B indukció nagyságával:

$$U_H = R_H \cdot I \quad (8)$$

ahol U_H a Hall-feszültség, R_H a Hall-ellenállás, I pedig az áramerősség.

Gyakran a (8) kifejezést az áram meghatározására alkalmazzák.

5 AZ AMPER

Az amper eredeti, 1960-as definíciója a gyakorlatban megvalósíthatatlan volt, tekintve, hogy „végtelen hosszú” vezetőpár közti kölcsönhatásról szólt. A megújult SI az elektron töltéséhez kötötte az amper fogalmát: „Az áramerősség mértékegysége az amper; jele: A. Definíció szerint az elemi töltés (e) rögzített számértéke legyen $1,602176634 \cdot 10^{-19}$, amely C egységben van kifejezve, ami megegyezik az A · s-mal, ahol a másodpercet $\Delta\nu_{Cs}$ határozza meg.” [2].

A megvalósításnak több útja van [1]. Közülük két lehetőség:

- Az Ohm-törvény felhasználásával, alkalmazva a Josephson- és a kvantum Hall-effektusokat,
- Az egy elektron transzport segítségével (SET: single electron transport).

5.1 Az amper megvalósítása az Ohm-törvény alkalmazásával

Az amper Ohm-törvényén keresztüli megvalósítása a *Kibble balance* leírásánál említett Josephson- és Hall-effektusokon keresztül történik [25][26][29].

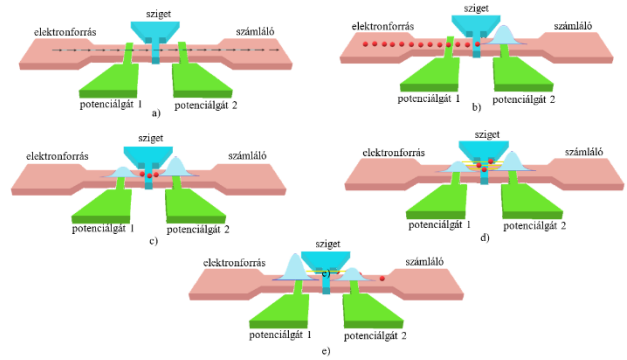
A megvalósítandó kifejezés:

$$I = U/R \quad (9)$$

Az ún. PQCG (programmable quantum current generator) leírása, illetve működési elvének ismertetése meghaladja ezen összefoglaló kereteit. A megvalósításról szóló összefoglaló megtalálható a [31] irodalomban.

5.2 Az amper megvalósítása egy elektrontranszport alkalmazásával

1 amper áramerősség esetén 1 másodperc alatt (a definíció alapján) egy vezető keresztmetszetén $6,241509 \cdot 10^{18}$ elektron halad át. Az amper megvalósításának ezen módja az elektronok megszámlálásán alapul [32][33].



13. ábra: SET megvalósítás

A 13. ábra a) része egy alap kvantumrendszert ábrázol, egy elektronforrás és egy elektronszámláló között akadálytalanul haladhatnak az elektronok. A b) ábra részen a „potenciálgát 2” egy olyan akadályt jelent az elektronoknak, amelyen keresztül nem tudnak áthaladni. A „sziget”-re beáramlott elektronok mögött a „potenciálgát 1” is megemelkedik, megakadályozva, hogy az elektronok visszaáramoljanak. c) A két potenciálgát között lévő elektronok egy kvantumrendszert alkotnak, ami azt jelenti, hogy minden elektronnak egy energianívón kell elhelyezkednie (2 elektron lehet egy nívón, ellentétes spinnel, Pauli-féle kizárási elv). d) Végül a „potenciálgát 2” csökkentésével a legfelső energianívón lévő elektron kiszabadul, és a számlálóba kerül.

A jelenkori megvalósításnál mintegy 10^8 elektront tudnak megszámolni másodpercenként, de a technika fejlődésével ez közelíteni fogja az 1 ampert.

6 A KELVIN

A kelvin definíciója 2019 óta jelentősen megváltozott: „A termodinamikai hőmérséklet mértékegysége a kelvin; jele: K. Definíció szerint a Boltzmann-állandó (k) rögzített számértéke legyen $1,380649 \cdot 10^{-23}$, amely $J \cdot K^{-1}$ egységben van kifejezve, ami megegyezik a $kg \cdot m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$ -nel, ahol a kilogrammot, a métert és a másodpercet h , c , illetve $\Delta\nu_{Cs}$ határozza meg.”

A régi SI-ben a megvalósítás a víz hármaspontján alapult. Az új definíció számos lehetőséget ad, többek között a hőmérsékleti skála más pontjaiban is lehetővé teszi az etalonok működését. Az új definíció eredete a statisztikus mechanikából származik, mely szerint a termodinamikai hőmérséklet a rendszer szabadsági fokaira eső átlagos termikus energia mértéke. Elvileg a termodinamikai hőmérséklet mértékegysége a joule, nem lenne szükség a kelvin egységre. Történelmi és gyakorlati megfontolásokból a kelvin maradt a hőmérséklet SI alapegysége. A BIPM CCT (hőmérsékletmérések tanácsadó bizottsága) több megvalósítási lehetőséget javasolt.

6.1 Akusztikus gáz-hőmérsékletmérés

Egy megvalósítási lehetőség az AGT (acoustic gas thermometry), amely az ideális gázban lévő hangsebesség (u) és a termodinamikai hőmérséklet (T) kapcsolatán alapul:

$$u^2 = \gamma \cdot k \cdot T/m \quad (10)$$

ahol k a Boltzmann-állandó, m a gázmolekulák átlagos tömege, γ a gáz állandó nyomáson és állandó térfogaton lévő hőkapacitásának aránya. Egyatomos gázokra $\gamma=5/3$.

6.1.1 Abszolút-primer akusztikus gáztermometria

A hangsebesség meghatározása egy izotermikus üregben lévő egyatomos gáz rezonanciafrekvenciájából származtatható. A rezonanciafrekvenciák pontos meghatározásához nem-degenerált akusztikus módusok szükségesek, ilyen célra gyakran közel gömb alakú üregeket használnak.

Az akusztikus rezonanciafrekvenciákat, a nyomást, az üreg dimenzióit és a gázmolekula-tömegeket vissza lehet vezetni a méterre, a kilogrammra és a másodpercre. A primer AGT módszer bizonytalansága a víz hármaspontjánál 10^{-6} nagyságrendben van.

A témával kapcsolatos áttekintés a [34] irodalomban található.

6.1.2 Relatív akusztikus gáztermometria

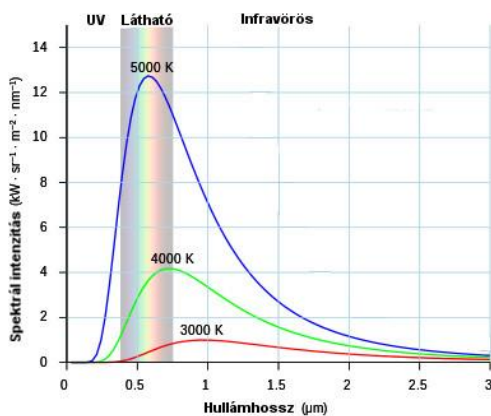
A módszer részletes leírása ugyancsak a [34] irodalomban található. A relatív mérések esetén csak az adott T hőmérséklet és egy T_{ref} referenciahőmérséklet aránya kerül meghatározásra, nem az abszolút érték. A tipikus bizonytalanság $3 \cdot 10^{-6}$. A relatív akusztikus gáz termometriai módszer alkalmazási skálája néhány kelvintől 550 K tartományra terjed ki.

6.2 Spektrálsáv radiometrikus termometria

A spektrálsáv radiometrikus termometria alapja a testek feketetest-sugárzásának Planck-törvényén alapul. A törvény alapján a sugárzás intenzitása (spektrális komponensektől való függése) függ a T hőmérséklettől és a Boltzmann-állandótól:

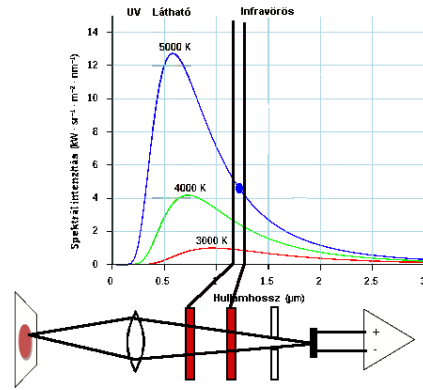
$$I(\lambda, T) \propto \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad (11)$$

ahol k a Boltzmann-állandó, h a Planck-állandó, c a fénysebesség, λ a hullámhossz és T pedig a hőmérséklet. Az összefüggés által adott hőmérsékleten meghatározott spektrális eloszlást a 14. ábra szemlélteti.



14. ábra: A Planck-féle feketetest-sugárzás spektruma

A hőmérséklet meghatározására alkalmazott berendezés sematikus elrendezését mutatja a 15. ábra.



15. ábra: A spektrális hőmérsékletmérés sematikus elrendezése

A céltárgyról jövő feketetest-sugárzás egy gyűjtőrendszeren keresztül áthalad két (vagy több) szűrőn, amelyek után már csak egy szűk frekvenciasávban lévő nyaláb halad tovább. Egy kollimátort követően a sugárnyaláb az érzékelőre jut, amely méri az intenzitást. A szűrők cseréjével a spektrum több pontjában is meg lehet mérni az intenzitást, amelyekből vissza lehet számolni, hogy az adott eloszlás mekkora hőmérséklethez tartozott.

Ezt a módszert általában 1500 K felett alkalmazzák.

7 A MÓL

A mól eredetileg az SI megalkotásakor, 1960-ban még nem volt alapegység. Az anyagmennyiség definíciója 1971-ben került az alapegységek közé, leszámaztatása a ^{12}C tömegén és az Avogadro-számon keresztül történt. A 2019-es új SI-ben azonban már igazi alapegységként szerepel. A [2] irodalom alapján: „Az anyagmennyiség mértékegysége a mól; jele: mol. Egy mól pontosan $6,02214076 \cdot 10^{23}$ elemi egységet tartalmaz. Ez a szám az Avogadro-állandó (N_A) rögzített értéke mol^{-1} egységben kifejezve, az ún. Avogadro-szám. Az anyagmennyiség (jele: n) egy rendszer meghatározott elemi egységei számának a mérőszáma. Az elemi egység lehet atom, molekula, ion, elektron, bármely más részecske vagy meghatározott részecskecsoport.”

A mól megvalósítása ^{28}Si gömb alkalmazásával történik. A szilícium-gömb sokáig jelölt volt a kilogramm definíciójáért való versenyben, azonban a *Kibble balance* általi megvalósítása kisebb bizonytalansággal vált lehetővé, ezért a kilogramm definíciója a Planck-állandóhoz lett csatolva.

A szilíciumgömb létrehozásához először dúsítással nagy tisztaságú (99,99%) ^{28}Si alapanyag készül. Ebből az alapanyagból növesztett nagy tisztaságú szilícium egykristályból kerül kialakításra a gömb. A gömbalaktól való eltérés kisebb mint 50 nm, a felületi érdesség pedig kisebb mint 0,2 nm. Egy, a PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt) által elkészített ^{28}Si gömböt mutat a 16. ábra [35].



16. ábra: Nagytisztaságú szilíciumgömb

A gömbben lévő ^{28}Si -atomok számát megadó kifejezés:

$$N = 8V_s/a(\text{Si})^3 \quad (12)$$

ahol V_s a kristály térfogata, 8 a szilícium kristálycellájában lévő atomok száma, $a(\text{Si})$ pedig az egységcella rácsállandója. A megvalósítás alapvető feltétele a rácsállandó meghatározása, amely XRCD- (X-ray crystal density) módszer alkalmazásával történik.

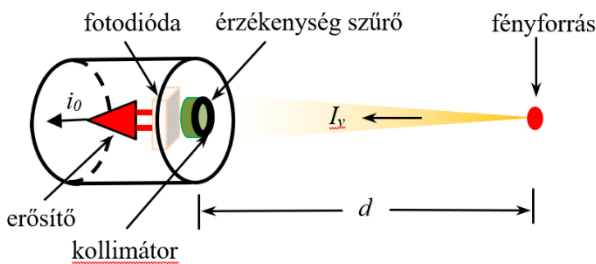
Az XRCD-módszer leírása és a szilícium gömb rácsparaméterének meghatározása a [36] irodalomban részletesen megtalálható.

8 A KANDELA

A kandela az egyetlen olyan SI alapegység, amely (az új SI szerint) nem természeti állandóhoz kötődik. A definíciója egy ún. technikai állandón (K_{cd}) keresztül valósul meg [2]: „A fényerősség mértékegysége a kandela; jele: cd. Definíció szerint az $540 \cdot 10^{12}$ Hz frekvenciájú monokromatikus sugárzás fényhatásfoka állandójának K_{cd} rögzített számértéke legyen 683, amely $\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$ egységben van kifejezve, ami megegyezik a $\text{cd} \cdot \text{sr} \cdot \text{W}^{-1}$ -nel, vagy a $\text{cd} \cdot \text{sr} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^3$ -nal, ahol a kilogrammot, a métert és a másodpercet h , c és $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ határozza meg.”

Egy lehetséges megvalósítás bemutatása a [37] irodalom alapján történik.

Az emberi szem relatív spektrális érzékenységét az International Commission on Illumination (CIE) határozta meg először 1924-ben, majd 1983-ban, a 360 nm és 830 nm intervallumban az 555 nm-es ($540 \cdot 10^{12}$ Hz) csúcsra normálva. Az emberi szem érzékenysége 555 nm-es hullámhossznál a legerősebb, az ehhez tartozó csatolási állandó a K_{cd} , amelynek számértéke 683. A régebbi megvalósítás a gyertya fényéhez (a fényforráshoz) kötődött, míg az új definíció megvalósítása a detektorhoz kapcsolható. A mérési elrendezést mutatja a 17. ábra.



17. ábra: A kandela megvalósítása

A fényerősség a fényforrás és a fotométer közötti d távolság esetén:

$$I_v = (i_0/R_v) \cdot (d^2/\Omega_0) \quad (13)$$

ahol I_v a fényerősség, Ω_0 a térszög, R_v pedig a fotométer fényerősség érzékenysége. R_v megadható:

$$R_v = (A \cdot \int S_{(\lambda)} r_{(\lambda)} d\lambda) / (K_m \cdot \int S_{(\lambda)} V_{(\lambda)} d\lambda) \quad (14)$$

ahol A a kollimátor felülete, $V_{(\lambda)}$ a relatív spektrális fényhatásfok függvény, K_m a maximális fényhatásfok (683 lm/W). $S_{(\lambda)}$ a fényforrás spektrális eloszlásfüggvénye (felhasználva a feketetest-sugárzást 2856 K esetén), és $r_{(\lambda)}$ a fotométer teljes abszolút spektrális hatásfoka.

9 AZ ÚJ SI ELŐNYEI ÉS HÁTRÁNYAI

Az előző fejezek érzékeltették azt a technikai szabadságot, amelyet az új SI definíciók nyújtottak (tanak).

Az új SI bevezetésének legfontosabb indokait és előnyeit a BEVEZETÉS fejezet tartalmazza.

Azonban meg kell említeni, hogy az előnyök mellett nehézségekkel is szembe kell nézni.

A definíciók megvalósítása nagyon magas szintű technikai felkészültséget, mérnöki/fizikusi ismereteket igényel. Az új etalonok létrehozása és alkalmazása a kvantummechanika (számos esetben a kvantumelektrodinamika) ismeretét feltételezi.

Habár számos, az új definíciókat megvalósító etalon már kereskedelmi forgalomban is elérhető, de jelentős anyagi kiadással jár, különösen ezeknek a berendezéseknek a metrológiai célra történő specializálása.

A SI mértékegységrendszer definícióinak oktatása és a megvalósítási lehetőségei már kikerültek a középiskolás keretek közül.

A felsorolt nehézségek ellenére az új definíciók és azok alkalmazásai megnyitották a lehetőséget egy pontosabb, széles skálájú megvalósítás felé.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] SI-BROCHURE-9 (2019). The International System of Units (aktualizálva 2024). <https://www.bipm.org/en/publications/si-brochure>
- [2] 127/1991. (X.9.) Korm. rendelet a mérésügyről szóló törvény végrehajtásáról.
- [3] Le Systéme International d'Unités (SI) (SI Brochure 1), Pavillon de Breteuil, F-92-Sèvres, France, 1970.
- [4] Friedrich B., Herschbach D. (2003). Stein and Gerlach: How a Bad Cigar Helped Reorient Atomic Physics, *Physics Today* 56(12) 53-59.
- [5] Lombardi M. A., Heavner T. P., Jefferts S. R. (2007). NIST Primary Frequency Standards and the Realization of the SI Second, *NCSL International Measure*, 2(4)74-89.
- [6] Essen L. Parry J. (1955). An Atomic Standard of Frequency and Time Interval: A Caesium Resonator, *Nature*, Vol. 176, 280-281.
- [7] Shirley J., Lee W., Drullinger R. (2001). Accuracy evaluation of the primary frequency standard NIST-7, *Metrologia* Vol 38, 427-458.
- [8] Wineland D., Dehmelt H. (1975). Proposed $10^{14} \Delta\nu < \nu$ Laser Fluorescence Spectroscopy on Tl^+ Mono-Ion Oscillator III, *Bulletin of the American Physical Society*, Vol. 20, 637.
- [9] Hänsch T. W., Shawlow A. L. (1974). Cooling of gases by laser radiation, *Optic Communication*, 13(1) p. 68.
- [10] Domokos P. (2005). Semleges atomok lézeres hűtése és csapdázása, *Fizikai Szemle*, 45(6) 193-198.
- [11] <https://www.nist.gov/news-events/news/1999/12/mist-f1-caesium-fountain-clock>. (aktualizálva 2025).
- [12] <https://www.nist.gov/atomic-clocks/optical-clocks-future-time>
- [13] <https://physicsworld.com/a/optical-clocks>, 2005,
- [14] *Proceedings of the 1st CGPM* (1889), 1890, p. 38.
- [15] 17e CONFÉRENCE GÉNÉRALE DES POIDS ET MESURES, 1983, ISBN 92-822-2084-2, p. 97.

- [16] Schödel R., Yacoot A., Lewis A. (2021). The new *mise en pratique* for the metre – a review of approaches for the practical realization of the traceable length metrology from 10^{-11} m to 10^{13} m.
- [17] <https://www.bipm.org/en/publications/mises-en-pratique/standard-frequencies-metre>
- [18] <https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?d220sil>
- [19] Basile G., Becker P., Bergamin A., Cavagnero G., Franks A., Jackson K., Kuetgens U., Mana G., Palmer E.W., Robbie C.J., Stedman M., Stümpel J., Yacoot A., Zosi G. (2000). Combined optical and X-ray interferometer for high precision dimensional metrology, *Proc. R. Soc. A*, 456 p. 701-719.
- [20] Orji N. G., Dixon R. G., Garcia-Gutierrez D. I., Bunday B. D., Bishop M., Gresswell M. W., Allen R. A., Allgair J. A. (2007). *Proc. of SPIE*, Vol. 6518.
- [21] Lawn M. A., Bolton Z., Murphy L., Gartner S., Oh Y., Coleman V. A. (2024). Step height measurement of monoatomic silicon crystal lattice steps with a commercial atomic force microscope, *Meas. Sci. Technol.*, 35.
- [22] Mirandés E., Zeggagh A., Bradley M. P., Picard A., Stock M. (2014), Superconducting moving coil system to study the behaviour of superconducting coils for a BIPM cryogenic watt balance, *Metrologia*, 51.
- [23] Kibble B. P., Robinson I. A. (2014). Principles of a new generation of simplified and accurate watt balances, *Metrologia*, 51.
- [24] Robinson I. A., Schlamminger S. (2016), The watt or Kibble balance: a technique for implementing the new SI definition of the unit of mass, *Metrologia*, 53.
- [25] Josephson B. D. (1962). Possible new effects in superconductive tunnelling, *Phys. Letters* 1, p. 251
- [26] <https://www.ptb.de/cms/en/ptb/fachabteilungen/abt2/abt2-josephson.html>
- [27] Stock M. (2011). The watt balance: determination of the Planck constant and redefinition of the kilogram, *Phil. Trans. R. Soc. A*, 369.
- [28] Fang H., Kiss A., Picard A., Stock A. (2014). A watt balance based on a simultaneous measurement scheme, *Metrologia*, 51.
- [29] Djordjevic S., Behr R., Poirier W. (2025). A primary quantum current standard based on the Josephson and the quantum Hall effects, *Nature Communications*, 16:1447.
- [30] Brun-Picard J., Djordjevic S., Leprat D., Schopfer F., Poirier W. (2016). Practical Quantum Realization of the Ampere from the Elementary Charge, *PHYSICAL REVIEW X* 6, 041051.
- [31] Djordjevic S., Behr R., Drung D., Götz M., Poirier W. (2021). Improvements of the programmable quantum current generator for better traceability of electrical current measurements, *Metrologia*, 58.
- [32] Giblin S. P., Kataoka M., Fletcher J. D., See P., Janssen T. J. B. M., Griffiths J. P., Jones G. A. C., Farrer I., Ritchie D. A. (2012). Towards a quantum representation of the ampere using single electron pumps, *Nature Communication*, 3:930.
- [33] Gamero M. E., Lapi A. J., Gimerez I. B. J., ChierChie F., Moroni G. F., Cervantes-Vergara B. A., Tiffenberg J., Estrada J., Paolini E. E., Cancelo G. (2025). Towards a quantum realization of the ampere using single-electron resolution Skipper-CCDs, *Cornell University, ArXiv*, 2502.07742
- [34] Moldover M. R., Gavioso R. M., Mehl J. B., Pitre L., Podesta M., Zhang J. T. (2014). Acoustic gas thermometry, *Metrologia*, 51.
- [35] https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/presse_aktuelles/messe_n_events/si-kg_workshop/Presentations/PTB_Si_SurfaceCharacterization_Busch.pdf
- [36] Fuji K., Bettin H., Becker P., Massa E., Rienitz O., Pramann A., Nicolaus A., Kuramoto N., Busch I., Borys M. (2017) Realization of the kilogram by the XRCD method, *Metrologia*, 53.
- [37] <https://www.nist.gov/pml/sensor-science/optical-radiation/realization-candela>