

A fizikai mennyiség fogalma; idő és hosszúság

Szabó Gábor

egyetemi tanár, SZTE Optikai Tanszék

A fizika alapvető feladata mennyiségi összefüggések megfogalmazása. Ehhez arra van szükség, hogy a fizikai objektumok, folyamatok kísérletileg vizsgálható tulajdonságainak leírására fizikai mennyiségeket vezessünk be. A fizikai mennyiséget (a továbbiakban egyszerűen mennyiséget) számérték és mértékegység algebrai szorzataként képezzük, azaz:

$$x = \{x\}[x],$$

ahol $\{x\}$ a számérték (korábban mérőszámnak is nevezték), $[x]$ a mértékegység.

Ahhoz, hogy a fenti kifejezés értelmes legyen, meg kell adni valamilyen mértékegységet. **A mértékegység az azonos fajtájú mennyiségek halmazából kiválasztott vonatkoztatási mennyiségérték.** A mértékegységet célszerűen etalon bevezetésével rögzíthetjük. (Etalon: valamely mennyiség mértékegységét reprodukálható módon megtestesítő mérőeszköz.)

Példa:

$x = 500 \text{ m}$ jelentése: a kérdéses távolság 500 m.

$$\frac{x}{[m]} = 500$$

alakban: a kérdéses távolság m-ben mérve 500.

Hogyan választhatók meg a mértékegységek? Elvileg az összes fizikai mennyiséghez hozzárendelhetünk tetszőleges mértékegységeket. Ez azonban gyakorlati szempontból nem célszerű, mivel így nagyszámú átváltási tényező keletkezik, amelyeket mind ismernünk kell a mértékegységek használatához.

A fentieket a következő példával lehet illusztrálni. Megtehetnénk például, hogy a sebesség mérésére önálló mértékegységet vezetünk be. Ezt a mértékegységet – nevezzük pl. Galileinek – definiáljuk úgy, hogy az legyen egyenlő a Föld felszínén 1m magasságból leejtett test becsapódási sebességével. Ha tehát egy feladat megoldásaként a távolság és az idő ismeretében az adódik, hogy a keresett sebesség 2 m/s, akkor itt még nem állhatunk meg, hiszen eredményünket Galileiben kell megadnunk. Azaz felhasználva a $4,429 \text{ m/s} = 1 \text{ Galilei}$ átszámítási tényezőt a végeredmény $v = 0,451 \text{ Galilei}$.

A sok önálló mértékegység bevezetése helyett **koherens mértékegységrendszert állítunk fel, azaz definiálunk néhány alpmennyiséget, majd az összes többi mértékegységet ezek egységeiből származtatjuk.** A bevezetendő alpmennyiségek számát ismét csak gyakorlati megfontolások alapján határozhatjuk meg; túl kevés alpmennyiség esetén a származtatott mértékegységek túlságosan bonyolulttá válhatnak. A nemzetközileg elfogadott SI rendszerben 7 alpmennyiség van, amelyek közül mechanikai tanulmányaink során hárommal (hosszúság, idő, tömeg) találkozunk. Az alábbiakban kissé részletesebben foglalkozunk a hosszúság, illetve az idő mérésével.

A hosszúság és az idő a fizikának olyan fontos alpmennyiségei, amelyekkel kapcsolatban a hétköznapi élet során igen sok gyakorlati tapasztalatot szerzünk, ennek ellenére általános, és a fizika számára is használható definíciót igen nehezen tudunk adni rájuk. (Egy fizikai mennyiség definíciójával szemben a legfontosabb követelmény az, hogy egyértelműen megállapítható legyen belőle az, hogy az illető mennyiséget hogyan lehet mérni).

Az idővel kapcsolatos problémákat a mai ember számára is elgondolkodtató módon fogalmazta Szent Ágoston több, mint 1500 évvel ezelőtt. Vallomásaiban egyebek között a következőket írja: „Mi hát az idő? Ha senki sem kérdezi tudom, ha kérdik tőlem, s meg akarom magyarázni, nem tudom... Nem mondok-e igazat, mikor azt vallom neked, hogy az időt mérni tudom? Mert így van ez Uram, Istenem, mérem, mérem, de mit mérek nem tudom.” Gondolatai több szempontból is mintegy 15 évszázaddal előzték meg korukat. Max Planck századunk elején fogalmazta meg általánosan azt az elvet, amelyet a továbbiakban mi is követni fogunk: egy fizikai mennyiség definíciója helyett elegendő megadni egy, a mennyiségre vonatkozó mérési utasítást.

Hosszúság

A hosszúság (távolság) az egyik legalapvetőbb mennyiség, amelynek mérése minden bizonnyal az emberi civilizáció kialakulásával egyidőben kezdődött. Ez érthető is, hiszen szerepe a térbeli tájékozódásban, majd később a kereskedelemben alapvető. (Egyfajta primitív hosszúság „fogalom” már méhek táncában is megjelenik.)

A mértékegységek és etalonok mindig együtt fejlődtek a méréstannal, illetve a fizikával, ezért hasznos röviden áttekinteni a hosszúság és idő alapegységeinek történetét. Kezdetben a hosszúság alapegységei általában az emberi testrészekhez, (hüvelyk, láb, könyök, stb.), illetve az emberi test egyéb méreteihez (lépés, öl, arasz, stb.) kapcsolódtak. Ez automatikusan teljesítette az alapmennyiségek mértékegységeivel szemben támasztott egyik fontos gyakorlati követelményt: a mértékegységeket célszerű úgy megválasztani, hogy segítségükkel a mindennapi élet tapasztalatai egyszerűen kifejezhetők legyenek.

Semmi elvi akadály nem lenne annak, hogy – mai fogalmainkat használva – pl. a fényévet válasszuk a hosszúság alapegységének. Ezt azonban nem tesszük, mert a hétköznapi életben zavaró lenne, ha pl. ruha varratáshoz $3 \cdot 10^{13}$ fényévnyi szövetet kellene kérnünk.

A sokféle, gyakran tájról-tájra változó mértékegység használata az átváltás során óhatatlanul is keletkező viták miatt a kereskedelem fejlődését zavaró tényezővé vált. A mértékegységeknek az ember testhez való kapcsolása minden praktikus előnye mellett egy további komoly hátránnyal is jár: nehéz az egységet időtálló módon rögzíteni. Ez a tudomány fejlődése szempontjából igen kedvezőtlen, mivel megnehezíti a tudományos eredmények átadását az utókornak.

A hellén csillagászat és geográfia számos eredményét az utókor nehezen tudja értékelni, mert egy fontos hosszúság egység, a stádium nagysága nem rekonstruálható egyértelműen.

Mindezek alapján két további követelmény fogalmazódott meg: a mértékegységeket a lehetőleg természeti állandókra vagy jól reprodukálható jelenségekre kell alapítani, és a lehető legnagyobb körben egyezményesen elfogadtatni. E téren áttörést hozott az 1790-es francia nemzetgyűlés, amely javasolta az MKS (méter-kilogramm-szekundum) egységrendszer kidolgozását. Az 1791-ben elfogadott méter tekinthető a hosszúság első, tudományosan meghatározott egységének.

Huygens már a XVII. században felvetette, hogy az egységeket ne az emberi test méreteiből, hanem természeti állandókból vezessék le. Javaslatára szerint pl. a hosszúság egysége a másodpercinger hossza (kb. 0,995 m) lett volna. Huygens gondolatai azonban mintegy száz évvel megelőzték korukat.

Az eredeti definíció szerint a méter egyenlő a Párizson áthaladó délkörnek az egyenlítő és az Északi-sark közé eső szakasza tízmilliomod részével. A mérőmódszerek fejlődésével mód nyílt a délkör egyre pontosabb mérésére, ami időről-időre a méter értékét is csekély mértékben megváltoztatta. Ezért 1889-ben az első Általános Súly- és Mértékügyi Értekezlet (francia elnevezése Conférence Générale des Poids et Mesures, rövidítve CGPM)

úgy határozott, hogy a métert egy platina-irídium méterrúd, az ú.n. ősméter segítségével definiálja.

Az 1927-ben elfogadott pontos definíció a következő: „A hosszúság mértékegységét – a métert – az a 0°C-on mért átlagos távolság határozza meg, amit arra a platina-irídium rúdra jelöltek, amelyet a Nemzetközi Súly- és Mértékügyi Hivatalban őriznek, és az első CGPM a méter alapegységének fogadott el azzal a feltétellel, hogy ezt a rudat normális légköri nyomáson tartják, és alátámasztják két, legalább 1cm átmérőjű görgővel, amelyek egymástól 571 mm távolságra, vízszintes síkban, szimmetrikusan helyezkednek el.” A definícióból, valamint a rúd anyagának és szerkezetének megválasztásából kitűnik, hogy a méter megalkotásánál a kor technikai színvonala által lehetővé tett legnagyobb gondossággal szűrték ki a lehetséges hibaforrásokat.

A méter etalon által megtestesített hosszúság leolvasásának hibája kb. 1 μ , azaz a relatív hiba kb. 10^{-6} . A mérőmódszerek további fejlődése során kiderült, hogy a méter már nem tesz eleget a mértékegységekkel szemben támasztott további fontos követelménynek, miszerint a mértékegység definíciója által biztosított pontosságnak el kell érnie, vagy legalábbis meg kell közelítenie az adott mennyiség mérésénél technikailag elérhető legnagyobb pontosságot. Mindezek miatt 1960-ban újabb nemzetközi megegyezés született, amely kihasználva azt a tényt, hogy a modern spektroszkópia lehetővé teszi a fény hullámhosszának igen precíz mérését, a métert a fény hullámhosszának segítségével definiálja.

A pontos definíció a következő: „A méter a 86-os tömegszámú kripton atom $2p_{10}$ és $5d_5$ energiaszintjei közötti átmenetnek megfelelő, vákuumban terjedő sugárzás hullámhosszának $1\ 650\ 763,73$ -szorosa.”

Az újfajta méterfogalom két szempontból is felülmúlja a korábit. Egyfelől megszünteti azt a veszélyt, hogy az ősméter esetleges megsemmisülése esetén a méter csak csökkent pontossággal rekonstruálható, másrészt, ami fontosabb, a megadás relatív hibája kb. $5 \cdot 10^{-9}$, azaz több, mint 100-szor kisebb mint az ősméteré.

A méterfogalom fejlődésében – főként a modern optika és lézerfizika 70-es években elért sikereinek köszönhetően – 1983-ban újabb áttörés következett be. Ekkor a 17. CGPM elfogadta a ma is érvényes definíciót, amely szerint **a méter annak az útnak a hosszúsága, amelyet a fény vákuumban 1/299 792 458-ad másodperc alatt tesz meg.**

A jelenleg érvényes méter definíció – amelynek megalkotásában a magyar származású Bay Zoltán elévülhetetlen érdemeket szerzett – előnyeit röviden az alábbiak alapján érthetjük meg. Amint azt elméleti és kísérleti érvek egyaránt alátámasztják a (vákuumbeli) fénysebesség a fizika egyik legfontosabb univerzális állandója. A fő elméleti érv az, hogy a fénysebesség állandósága egy igen fontos, nagyszámú független kísérlettel alátámasztott elmélet, a speciális relativitás elmélet egyik alapvető posztulátuma. Ezen túlmenően

– ez jelen megfontolásaink szempontjából még fontosabb – a ma ismert kísérleti eredmények alapján biztosan állíthatjuk, hogy a fénysebesség legalább 10^{-15} -es relatív hibáig állandó. Így a méterpontossága a 10^{-15} -es határig, meg fog egyezni az időegység pontosságával. A másodperc definíciójának pontossága 1983-ban kb. 10^{-13} volt, tehát az új méterszabvány mintegy négy nagyságrenddel pontosabbá vált, mint a korábbi. 2000-ben megjelentek az ú.n. optikai szökőkúton alapuló atomórák, amelyek (relatív) pontossága már eléri a 10^{-15} -t. Azt, hogy ez a pontosság a gyakorlatban mit jelent igazán akkor érthetjük meg, ha meggondoljuk, hogy a hidrogén atom átmérője kb. $5 \cdot 10^{-11}$ m.

A fénysebesség állandóságának elve a metrológia számára azzal a fontos következménnyel is jár, hogy az időmérési módszerek a távolságmérésben is felhasználhatók. Ezen az elven működik a hétköznapi életben is egyre nagyobb szerephez jutó globális helyzetmeghatározó rendszer (global positioning system, GPS). Ennek lényege, hogy a megfigyelő pontos földrajzi pozícióját, pontosan ismert helyzetű műholdaktól mért távolságok alapján határozzák meg. A szükséges távolságadatokat a műholdak által kibocsátott elektromágneses jel mért terjedési idejéből számítják ki.

Az SI egységrendszer szabályai szerint valamely fizikai mennyiség megadására az SI által megengedett törvényes mértékegységeknek és a tíz pozitív vagy negatív kitevős hatványait kifejező ú.n. prefixumoknak a kombinációja használható. (Egyszerre legfeljebb egy prefixum alkalmazható, ezért szabálytalan pl. a korábban a spektroszkópiában széles körben használt millimikron mértékegység.) Az SI által megengedett prefixumok a következők:

exa	–	10^{18}
peta	–	10^{15}
tera	–	10^{12}
giga	–	10^9
mega	–	10^6
kilo	–	10^3
milli	–	10^{-3}
mikro	–	10^{-6}
nano	–	10^{-9}
piko	–	10^{-12}
femto	–	10^{-15}
atto	–	10^{-18}

A hosszúság esetében a felsoroltak mellett az SI kivételesen megengedi a centi és deci prefixumok használatát. A fentiek mellett léteznek olyan nem SI mértékegységek, amelyek kizárólag bizonyos speciális területeken alkalmazhatók. Ilyenek a tengerhajózásban és légiközlekedésben a tengeri mérföld, illetve a csillagászatban a csillagászati egység, a fényév és a parsec.

Idő

Az idő, a hosszúság mellett a fizikának az egyik legalapvetőbb mennyisége. Mérésére önmagával azonos módon, tetszőlegesen sokszor lejátszódó események egymásutánja használható. (Az ilyen események sorozatát periodikus folyamatnak nevezzük.) A legszembetűnőbb, és így nyilván az időfogalom kialakulásában is döntő szerepet játszó periodikus folyamat a nappalok és éjszakák váltakozása. A csillagászat, illetve a naptárkészítés fejlődésével megjelentek a napnál rövidebb és hosszabb időegységek, sőt a kb. 30 napos holdhónap, valamint 360 napos év alapján külön számrendszerek (12-es és 60-as) alakultak ki, amelyeket ma már csak az időmérésben használunk. A tudomány fejlődése magával hozta végül a rövid (perc, másodperc) időegységek kialakulását.

Az idő első tudományosan meghatározott alapegysége a másodperc volt, amelyet 1820-ban egy francia tudóscsoport javaslatára a közepes szoláris nap $1/86400$ részeként definiáltak.

A szoláris nap a Nap két egymás követő delelése közt eltelt idő. Miután a Föld a Nap körül nem egészen körpályán kering, és a Föld forgástengelye sem merőleges a keringés síkjára, a szoláris nap hossza az év során – néhány perc nagyságrendben – állandóan változik. Az ebből származó bonyodalmak kiküszöbölésére bevezették a közepes szoláris nap fogalmát, amely akkor lenne megfigyelhető, ha a Föld körpályán keringene, és forgástengelye merőleges lenne a pálya síkjára.

A Föld tengely körüli forgásának részletes vizsgálata során kiderült, hogy az a Föld belsejében, illetve felületén létrejövő tömegátrendeződések miatt ingadozik, valamint csekély mértékben folyamatosan lassul.

A Föld légkörében fellépő szélhatások, illetve az északi féltekén a lombtakaró szezonális változása a Föld forgásidejének mérhető ingadozásához vezetnek. A Föld forgása július-augusztus hónapokban igen kismértékben lelassul. Ezt azt jelenti, hogy ilyenkor egy fordulat az átlaghoz képest kb. $5 \cdot 10^{-4}$ s-al hosszabb ideig tart. Amikor az északi féltekén tél van, azaz februárban, a forgás nagyjából hasonló mértékben

felgyorsul. A szezonális változások mellett – elsősorban a belső súrlódás által okozott energiavesztés miatt – a Föld forgása folyamatosan lassul. Ennek mértéke hozzávetőlegesen $2,5 \cdot 10^{-4}$ s/év.

A Föld Nap körüli keringési (efemeris) idejét a külső tényezők sokkal kevésbé befolyásolják. Emiatt 1960-ban a CGPM a másodperc efemeris időhöz kötött definícióját hagyta jóvá. Ennek értelmében a másodperc az 1900. január 0-i 12 óra efemeris időhöz tartozó tropikus év $1/31\,556\,925,9747$ része.

A spektroszkópia és az atomfizika rohamos fejlődése a század hatvanas éveiben lehetővé tette a másodperc sokkal pontosabb és időtállóbb definíciójának megalkotását. Ennek alapját az alkotja, hogy az atomok, molekulák meghatározott energiaszintjei közötti átmenetekhez tartozó sugárzások rezgésszáma a külső körülményektől, és mai tudásunk szerint a kozmológiai idő múlásától is független. Az ún. atomórák ilyen karakterisztikus rezgéseknek a számlálásával működnek. Az újfajta mérési elv további előnye, hogy a rezgések periódusideje igen rövid, így a mérés nagyszámú „beütés” összeszámlálásán alapszik, ami a pontosságot tovább növeli. A fentiek alapján a másodperc 1967-ben elfogadott, ma is érvényes meghatározása a következő: **a másodperc az alapállapotú cézium-133 atom két hiperfinom energiaszintje közötti átmenetnek megfelelő sugárzás 9 192 631 770 periódusának időtartama.**

Az új definíció lényegesen pontosabb volt a korábnál. Az akkor elérhető cézium atomórák járásában kevesebb, mint 1 másodperc eltérés léphetett fel 30 000 év alatt. Az ennek megfelelő 10^{-12} relatív pontosság egyúttal a másodperc definíciójának pontosságát is megadta.

Az atomórák pontosságának jelenlegi korlátja elsősorban az atomok mozgásával kapcsolatos zavaró hatásokból adódik. Az utóbbi néhány évben sikerült kifejleszteni az ún. lézeres csapdákon alapuló atomi szökőkutakat, amelyekben az atomok csak a nehézségi erő hatása alatt mozognak. Az atomi szökőkutakon alapuló Cs atomórák pontossága jelenleg 10^{-15} , és remény van arra, hogy néhány éven belül 10^{-16} - 10^{-17} relatív pontosságú atomórák készüljenek.

Az idő mérésével kapcsolatos speciális probléma, hogy az időegység megadása mellett az idő múlását is regisztrálni kell. Erre a célra továbbra is a szoláris idő szolgál, mivel az emberi tevékenység ritmusa a megfelelő napszakokhoz kötődik. Az ún. világidőt mérő atomórák pontossága ugyanakkor jóval meghaladja a Föld forgásidejének állandóságát, ezért a Föld kellően hosszú idő elteltével „kiesik a ritmusból”. Az ebből adódó problémák elkerülésére időről-időre igen nagy pontossággal megméri bizonyos csillagok helyzetét, amelyből meghatározható az atomórák által nyilvántartott világidő és a szoláris idő eltérése. Ha ez az eltérés meghaladja a 0,1 másodpercet, akkor az atomórákat ennek megfelelően korrigálják.

Természetes egységek

Mai tudásunk szerint három igazán alapvető természeti állandó létezik, a Planck állandó, vagy hatáskvantum h , a (vákuumbeli) fénysebesség c , és a gravitációs állandó γ . Ha ezen állandók kombinációjából egy hosszúság jellegű – pontosabb elnevezéssel hosszúság dimenziójú – mennyiséget (l_P) akarunk kialakítani, az csak egyféleképpen lehetséges azaz:

$$l_P = \sqrt{\frac{h\gamma}{c^3}} .$$

Ha a fenti kifejezésbe behelyettesítjük az állandók értékeit, akkor $l_P = 4.10^{-35}$ m adódik. l_P -t – amelyet szokás Planck hosszának is nevezni – tekinthetjük a hosszúság egy természetes egységének. Bizonyos megfontolások ráadásul azt sugallják, hogy l_P lehet a fizikailag még értelmesnek tekinthető legkisebb hosszúság.

Egy meglehetősen vázlatos gondolatmenet pl. a következő. Ahhoz, hogy egy a Planck hosszúság nagyságrendjébe eső távolságot meg tudjunk mérni, szükség lenne olyan fotonokra, amelyek hullámhossza ennél nem nagyobb. Ha sikerülne ilyen fotont – melynek energiája $4,5.10^9$ J – előállítani, akkor az olyan energia, és ezen keresztül tömeg sűrűséget jelentene, amelynél a foton fekete lyukat képezve önmagát csapdába ejtené. Ebből az következik, hogy ilyen kis skálán (távolság)méréseket végezni elvi okokból nem tudunk, ami azzal ekvivalens, hogy a távolság fizikailag többé nem értelmezhető.

Kézenfekvő ezután, hogy időegységnek azt az időt tekintsük, amely alatt a fény a Planck hosszat befutja, ami $t_P = 1,3.10^{-43}$ s. Érdekes meggondolni, hogy a világmindenség korát (kb. 10^{10} év) Planck egységben mérve 10^{60} -at kapunk.