Egységek és etalonok

Az idő egysége és etalonja

Ez a cikk az idő egységének és etalonjának kialakulását követi nyomon. Bemutatja az egység megvalósításához alkalmazható méréstechnikákat és az etalon gyakorlati kivitelezésének fejlődését az időszemlélet kialakulásától napjainkig.

Bevezetés

A megfigyelt természeti jelenségek körében az emberi tudat kialakulásától kezdve elkülöníthető a térben és az időben lezajló mozgás. Az idő érzékelésének és mérésének lehetőségét olyan természeti jelenségek megfigyelése nyújtotta, amelyek azonos időtartamok elteltével megismétlődtek. A fizika ezeket a történéseket *periodikus jelenségeknek* nevezi. Ilyen periodikus jelenségek a napszakok, az évszakok változásai, a Hold fényváltozásai. A rendszeresen megismétlődő természeti jelenségek megfigyelése jól használható időegységeket eredményezett, amelyek alkalmasnak bizonyultak az eltelt idő mérésére.

Az anyag mozgásai az Einstein-féle általános relativitáselmélet szerint olyan egységes *téridő rendszerben* történnek, amelyben a térkoordináták és az idő mellérendeltségi viszonyban állnak egymással, sőt bizonyos értelemben egyenértékűek. Einstein a maga egyenleteit a Minkowski-féle négydimenziós térre alapozva írta fel, ahol a négy tengely közül három a háromdimenziós tér három tengelyének megfelelően hosszúságegységekben skálázott, a negyedik tengely pedig $j \cdot c \cdot t$ skálázású, ahol j a képzetes egység, c a fénysebesség és t az idő. Figyelemre méltó, hogy a $c \cdot t$ szorzat ugyancsak hosszúság dimenziójú.

Az idő minden egységrendszerben alapmennyiség, semmilyen más alapmennyiségből nem származtatható, és nem lehet olyan egységrendszert felépíteni, amely nélkülözni tudná az idő egységét. Tény azonban, hogy az időt - éppúgy, mint a tömeget vagy más fizikai mennyiséget - nem lehet fogalmilag pontosan meghatározni, és csak arra a kérdésre válaszolhatunk, hogyan tudjuk mérni ezt a mennyiséget. A mindennapi szóhasználatban az *idő* és az *időtartam* fogalmak gyakran összemosódnak.

Az idő a Nemzetközi Mennyiség-rendszerben is alapmennyiség, egysége, a másodperc pedig alapegység az SI-ben. Meghatározása szerint *a másodperc az alapállapotú cézium 133 atom két hiperfinom energiaszintje közötti átmenetnek megfelelő sugárzás 9 192 631 770 periódusának időtartama*. A másodpercnek az SI-ben adott meghatározása tehát - épp úgy, mint a méteré - igazi természeti állandón alapul. Ennek a meghatározásnak az értelmezéséhez azonban a történeti fejlődés útját kell végigkövetnünk.

1997. évi ülésén a CIPM megerősítette, hogy a másodperc jelenleg érvényes meghatározása a 0 K hőmérsékleten levő, alapállapotú cézium atomra vonatkozik. Ennek a kiegészítő értelmezésnek a célja annak a tisztázása volt, hogy az SI másodperc meghatározása olyan cézium atomon alapul, amelyet nem zavar feketetest sugárzás, vagyis amely 0 K termodinamikai hőmérsékletű környezetben van.

Az időmérés két feladata

Az időmérés két feladata: az egység meghatározása és a vizsgált időtartam alatt eltelt időegységek regisztrálása. Az első alapvető fontosságú időegységet a természetben megfigyelhető legrövidebb periodikus jelenség szolgáltatta: a *nap*. Ezt az időegységet a Nap látszólagos mozgása alapján lehetett meghatározni, és ennek az időegységnek a felosztásával adódott néhány, ma is használatban levő, kisebb időegység: az *óra*, a *perc* és a *másodperc*. A nap egység felosztására, finomítására azért volt szükség, mert a hónapok, az évek, ezek a jól megfigyelhető időtartamok, nem egész számú napból állnak, és a köztük való átszámításhoz az egység törtrészeire is szükségesek.

Az egy nap időegység felhasználásával készített, és az egységnél hosszabb időtartamok körében az időmérés eszköze a *naptár*, az egy napnál kisebb időegységeket előállító szerkezetek pedig az *órák*.

Analóg és digitális *működésű* órák készíthetők, Az analóg működésű órák egyszerű és pontatlan eszközök voltak, mint például a homokórák, a vízórák, vagy a napórák. A pontossági igény fokozódása vezetett a digitális működésű órák kifejlesztéséhez és pontosságuk állandó növeléséhez. Ez a folyamat napjainkig tart.[1]

A digitális működésű óra két fő funkciója: a periodikus események előállítása és azok megszámlálása. Ezt a két funkciót a digitális működésű óra szerkezetileg elkülönült egységei végzik el. A periodikus események sorát kezdetben inga vagy billegő állította elő, manapság a *kvarcórák* elektronikus generátora, vagy a *kvantumórák* időalap-generátora. A számlálószerkezet az ingához vagy a billegőhöz csatlakozó gátszerkezetből és fogaskerék-áttételből fejlődött ki a digitális osztó- és számláncig, a kijelző pedig a számlap előtt mozgó mutatóból a számjegyes (digitális) kijelzőig.

Az idő jellemzői

Az időnek három alapvető jellemzője van: (1) analóg mennyiség, (2) homogén és (3) megfordíthatatlan (irreverzibilis).

Az idő analóg mennyiség, nincs természetes kvantuma, vagyis nincs olyan legkisebb időtartam, ami ne lenne tovább osztható. Az idő múlását jelző periodikus események, amelyek egyúttal lehetővé teszik az idő mérését, nem az idő, hanem az anyag eseményei. Az időegységek célszerűen megválasztott, önkényes egységek. Az idő analóg jellegéből következik, hogy a technikai lehetőségek határain belül tetszőleges pontossággal mérhető. Megjegyzésre érdemes, hogy a fizikai mennyiségek közül jelenleg az időt (és ezzel együtt a frekvenciát) lehet a legnagyobb pontossággal mérni.

Az idő homogenitása abban nyilvánul meg, hogy az időben nincsenek kitüntetett pontok. Az anyagi világ jelenségei a kezdeti időpont megváltoztatásától függetlenül ugyanúgy mennek végbe, és a kezdeti időpont megválasztása nem befolyásolja az anyag mozgástörvényeit.

Az idő megfordíthatatlansága abból következik, hogy az anyagi világban mindenhol és mindenkor érvényes az *oksági összefüggés*, más szóval a kauzalitás, amely szerint az ok

[1] A digitális működés nem azonos a digitális kijelzéssel, és ezt fontos jól megkülönböztetni!

kiváltja az okozatot, és mivel a hatás véges sebességgel, legfeljebb a fény sebességével terjed, az ok időben mindig megelőzi az okozatot. Az idő tehát mindig múlt → jövő irányítású, azaz irreverzibilis.

Az időadatok értelmezése

Az időadatok értelmezéséhez néhány fogalom tisztázása szükséges. Ezek: az *időpont* vagy időpillanat, az *időtartam* vagy időintervallum, a *kezdő időpont* és a dátumadat.

A háromdimenziós térben kifeszített derékszögű koordinátarendszerben egy térbeli pont helyzetének meghatározása a pont három hosszúság-dimenziójú koordinátájának megadásával történik. A koordináta számértéke arányos a rendszer origójától a pont vetületéig terjedő távolsággal. Egydimenziós esetben a pont a koordinátatengelyen fekszik (a pont maga azonos a vetületével) és ő maga tűzi ki az origótól mért távolságot, ami jellemzi pont helyzetét az egydimenziós térben. Egy *időpont* vagy *időpillanat* meghatározása az előbb bemutatott, egydimenziós térbeli feladattal egyenértékű. Az időpillanat megadása annak az *időtartamnak* (*időintervallumnak*) a megadásával történik, ami a *kezdő időponttól* az adott időpontig eltelik. A kezdő időpontot lehet egyezményesen meghatározni, de a feladat jellegétől függően szabadon is kitűzhető. Megállapodással (konvencionálisan) meghatározott kezdőponttól méri az időt a naptár és az óra, szabadon megválasztott kezdőponttól mér a *stopperóra*, és az elektronikusan működtetett időintervallum mérő berendezések.

Egy időadat tehát mindig időtartamot jelöl, akkor is, ha az intervallum-jelleg csak a szabadon kitűzött kezdőponttól történő mérésnél magától értetődő. Tekintsünk néhány példát a megállapodással kitűzött kezdő időpontokra!

- az időszámítás kezdete az évek számlálásakor;
- január elseje, a naptár kezdőpontja;
- az éjfél pillanata a napi időadatok mérésekor.

Az ilyen módon mért időadatok az úgynevezett *dátumadatok*, vagy röviden *dátumok*.

A feladat jellegének, szükségletének megfelelően kitűzött időpont lehet például:

- periódusidő mérésekor egy jelsorozat tetszőleges fázisú pontja. Ekkor a periódusidő a következő azonos fázisú pontig eltelt idő;
- egy jelenség bekövetkezése. Ekkor a másik jelenség bekövetkezéséig eltelt időt időintervallumnak nevezzük.

A fentiek szerint kétféle időmérést különböztethetünk meg: az *időpont-mérést,* és az *időintervallum-mérést.* Korábban az időmérés egyet jelentett a dátumadatok meghatározásával. Az időpont-mérésnek a navigációban, az űrhajózásban, a térképészetben és a haditechnikában ma is nagy jelentősége van. Az időintervallum-mérés a tudomány és a technika fejlődésével mind jelentősebbé vált. Igen nagy szerepe van egyebek között a kísérleti fizikában, az elektrotechnikában és a híradástechnikában.

Bár mindkét mérésfajta esetén az időegység a másodperc, érdekes és paradox jelenség, hogy az időegység kétféle származtatása között a továbbiakban, az időskálák ismertetésekor tárgyalt, lényeges különbség van.

Az idő mérése

Időskálák

Az óra időalap-generátorának az a feladata, hogy időegységnyi (vagy az időegység célszerűen kiválasztott törtrészével egyenlő) periódusidejű jelsorozatot állítson elő. Egy ilyen fizikai jelsorozat lehet például elektromos impulzusok sorozata. A jelsorozat valamilyen jól meghatározott fázisú pontja által kitűzött időintervallum-sorozatot, ha az órától, tehát dátumadat-mérő berendezéstől származik, az óra *időskálájának* nevezzük. Az időskálával szemben támasztott alapvető igény, hogy lehetőleg pontosan reprodukálja az időegységet. Az időskála fontos jellemzője annak *szinkronizált jellege*, vagyis az, hogy figyelembe vegye a megállapodással kitűzött kezdő időpontot. Az óra időskálája ezeknek a követelményeknek csak kisebb-nagyobb hibával felel meg, ezért azt időről-időre korrigálni kell.

Ezzel ellentétben az időintervallum-mérő berendezés alapgenerátorának a feladata pusztán az időegység reprodukálása. Ez a különbség az időegység kétféle származtatásában.

A korrigálást az egész Földön érvényes, egyetemes (univerzális) időskálával való összehasonlítás útján lehet elvégezni. Ezt az univerzális időskálát (jelölése UT az „universal time" angol szavak kezdőbetűivel) az idők folyamán többször is korrigálni kellett a pontossági igének növekedése miatt, de változatlan maradt az a közös jellemzője, hogy a skála alapját a Föld saját tengelye körüli forgásából (egy kivételes esetben a Nap körüli keringéséből) vezetik le.

A greenwichi időskála (UT 0)

Az első univerzális időskálát a Nap mozgásának megfigyelése alapján a greenwichi obszervatóriumban képezték. Az UT 0 képzésekor figyelembe vették a Föld elliptikus pályája és a Föld tengelyének a pálya síkjával bezárt szöge miatt szükséges korrekciókat. A másodperc időegység, egészen 1956-ig a korrekció után előállított, úgynevezett *középnap* 86 400-ad része volt definíció szerint. Az UT 0-t kezdetben ingórákkal tartották fenn, majd ezek helyébe a *kvarc-oszcillátor* lépett.

Az UT 1 időskála

Az UT 0 első módosítására és az UT 1 időskála bevezetésére akkor került sor, amikor kimutatták, hogy a Föld tengely körüli forgása nem egyenletes. A Föld kóválygó (szakszóval „vobbuláló") mozgást végez. Ennek oka az, hogy a Föld sarkai egy szabálytalan görbe mentén vándorolnak. A vándorló pólus, mozgása közben, nem lép ki egy mintegy 15 méter átmérőjű körből. Bármilyen kicsiny hatású is ez a *migrációnak* nevezett jelenség, létezése pontos órákkal és csillagászati eszközökkel kimutatható, és hatása nem elhanyagolható mértékű.

Az UT 2 időskála

Az időmérés pontosságának növelésére irányuló erőfeszítések oda vezettek, hogy a Föld forgásában két további szabálytalanságot fedeztek fel. Az egyik féléves, a másik egyéves periódusidejű. Ezeknek az ingadozásoknak a figyelembevétele az UT 2 időskála bevezetésével történt. Nincs a Föld tengelykörüli forgásán alapuló, más olyan skála, amely pontosabb lenne az UT 2 -nél. Az UT 2 időskála létrehozásával az időmérési pontosság ilyen módon történő, további növelésének a lehetősége lezárult. Új utakat kellett keresni.

Az efemeris időskála (ET)

Simon Newcombe angol csillagász a 19. század végén olyan táblázatokat állított össze az égi mechanika mozgásegyenletei alapján, amelyekkel képes volt előre megadni a Nap, a Hold és néhány bolygó jövőbeli égi pozícióját. Ezeket a táblázatokat *efemeriseknek* nevezte. Az efemerisek adatainak a 20. század második felében történt, későbbi elemzése arra az érdekes eredményre vezetett, hogy a táblázatokban szereplő égitestek helyzete jóval nagyobb mértékben eltér a táblázatokban megadott értékektől, mint amit a megfigyelési hibák indokolnának. Az adatok elemzéséből világossá vált, hogy az eltéréseket az UT időskálák tökéletlensége okozta. Az efemerisek segítségével a Föld Nap körüli keringésén alapuló, új időskálát képeztek, az ET-t. Az efemeris idő alapján meghatározott időegység az *efemeris másodperc* volt, amelyet a következőképpen definiáltak: *A másodperc a tropikus év időtartamának 31 556 925, 9747-ed része.*[2] A tropikus év megegyezik azzal az időtartammal, amelyet a Nap az ekliptikán két tavaszpont-áthaladás közben befut, hossza körülbelül 365,242199 középnap. Az efemeris másodperc korábban SI-egység volt, de mára használata már a csillagászatra korlátozódik.

A ma emberétől nem kívánható meg ezeknek az időskáláknak a pontos ismerete, mert a meghatározás bonyolult, sőt további szakkifejezések értelmezését igényelné. Érdemes azonban kiemelni, hogy a másodpercnek ez a definíciója több mint egy évtizedig, 1967-ig érvényben volt. Ez az időskála – különösen hosszú, évtizedes távon – sokkal állandóbbnak bizonyult, mint az UT, éves periódusa miatt azonban igen nehezen volt átszármaztatható a használati időmérő eszközökre.

Az óra és az időintervallum-mérő időegységét, mint láttuk, két különféle módon lehet származtatni. A dátumadatot mérő óra referencia időskálája a Föld tengely körüli forgásának szabálytalanságaihoz igazodó UT. Ezt a felhasználási terület jellege – navigáció, űrkutatás – teszi szükségessé. Ezek a területek a dátumadatok nagyon pontos mérését igénylik. Természetes, hogy amikor az UT skálát hozzá kell igazítani a Föld forgásának szabálytalanságaihoz, akkor egyúttal az időegységet, a másodpercet is meg kell változtatni. Ez a körülmény rendkívül zavaró az időintervallum-mérés szempontjából. Ennél a mérésnél ugyanis, a reprodukálhatóság igénye miatt, döntő fontosságú a változatlan időegység biztosítása.

Ezek az egymásnak ellentmondó igények vetették fel azt a gondolatot, hogy a kétféle mérés igényeinek kielégítése érekében külön időskálákat hozzanak létre. Az ET és az UT időskálákat bizonyos ideig továbbra is használták. A másodperc időegység meghatározása 1967-ben vált a csillagászati megfigyelésektől függetlenné.

Atomi időskálák

Az ET skála és az efemeris másodperc bevezetésekor, 1956-ban egyes vezető metrológiai intézeteknél már működtek olyan órák, amelyek a nagyon pontos időskála felállítására a cézium 133 atom elektronhéjában lejátszódó rezonancia-jelenséget használták fel. Ezeknek az úgynevezett *kvantumóráknak* a stabilitása tízezerszeresen felülmúlta az ET skála időbeli állandóságát. Amikor ilyen cézium-órák már nagy számban működtek több nemzeti metrológiai intézetben, és amikor már bebizonyosodott a megbízhatóságuk, akkor a 13. Általános Súly- és Mértékügyi Értekezlet 1967-ban a másodperc következő, a **Bevezetésben** már közölt definícióját fogadta el: *a másodperc az alapállapotú cézium 133 atom két*

[2] Ezt a definíciót a Nemzetközi Súly- és Mértékügyi Bizottság (rövidítése CIPM) 1956-ban javasolta, és a 11. Általános Súly- és Mértékügyi Értekezlet 1960-ban ratifikálta.

hiperfinom energiaszintje közötti átmenetnek megfelelő sugárzás 9 192 631 770 periódusának időtartama.[3]

A nemzeti metrológiai intézeteknél működő cézium-órák és óracsoportok atomi időskáláinak adataiból a Nemzetközi Órahivatal (rövidítése a francia elnevezés alapján: BIH) 1971-től kezdődően képezte a Nemzetközi Atomi Időskálát (TAI-t) A TAI-t az UT 2 időskála 1958 január 1-jén 0 órakor felvett helyzetéhez rögzítették, de természetesen nem követi az UT 2 változásait. A TAI időskála nagyon stabil, és biztosítja az SI-másodperc igen pontos és megbízható előállítását. Nem befolyásolják a Föld tengelykörüli forgásának ingadozásai, amelyekkel szemben az UT család tagjai kivétel nélkül érzékenyek.

A nemzeti idő-szolgálatoknál fenntartott órák összehasonlítási eredményeinek optimális kombinációja egy „világ referencia időskálát" eredményez: a 14. CGPM által 1971-ben jóváhagyott Nemzetközi Atomi Időt [International Atomic Time (TAI)].

A Nemzetközi Atomi Idő (TAI) a Nemzetközi Órahivatal által a különböző helyeken működő atomórák leolvasásai alapján, a Nemzetközi Mértékegység-rendszer időegységének, a másodpercnek a meghatározása szerint megállapított, koordinált referenciaidő. A TAI egy koordinált időskála, ami a forgó földalakon megvalósított SI-másodperccel, mint skála egységgel van meghatározva.

A TAI-ért való felelősséget a CIPM 1988. január 1-jén átvette a Nemzetközi Órahivataltól. A TAI feldolgozása két lépésben történik:

(1) Kiszámítják a mintegy ötven laboratóriumban működő körülbelül 200 óra súlyozott átlagát. Az alkalmazott algoritmus a hosszú idejű stabilitásra van optimalizálva, amihez az órák hosszú időtartamú viselkedésének a megfigyelése szükséges. Ebből következően a TAI egy késleltetett idejű időskála, ami általában néhány hetes késéssel válik ismertté. 1997-ben a TAI relatív frekvencia-stabilitása egy átlagos havi időtartamra vetítve 2×10^{-15} értékkel volt becsülhető.

(2) A TAI frekvencia pontosságát a TAI skálaegységnek az elsődleges frekvencia etalonok SI-másodperc megvalósításaival való összehasonlítása alapján értékelik. Ehhez olyan korrekciót kell alkalmazni, ami kompenzálja a relativisztikus fáziseltolódást az elsődleges etalon helye és egy, a forgó földalakon (geoidon) rögzített pont között. A korrekció nagysága a Föld felületén rögzített pontok között magasság-méterenként 1×10^{-16}. 1997-ben a különbség a TAI skálaegység és az SI másodperc között, a forgó földalakon $+2 \times 10^{-14}$ volt, és ez az érték 5×10^{-15} s bizonytalansággal volt ismert. A különbség csökkent a TAI frekvenciájára alkalmazott korrekció bevezetésével, ami kéthavonként 1×10^{-15} nagyságú. Ez a módszer javítja a TAI pontosságát, és ugyanakkor nem csökkenti a középtávú stabilitását.

---

[3] Várható, hogy a nem túl távoli jövőben ez a meghatározás a következőképpen fog módosulni: „A másodperc az idő egysége, olyan, hogy az alapállapotú ^{133}Cs atom két hiperfinom energiaszintje közötti átmenetnek megfelelő sugárzás frekvenciája pontosan 9 192 631 770 hertz."
Az átmenetnek megfelelő sugárzás frekvenciája $\Delta\nu(^{133}\mathrm{Cs})_{\mathrm{hfs}} = 9\ 192\ 631\ 770$ Hz, ami, tekintettel arra, hogy a Hz = s^{-1}, azt eredményezi, hogy $1\ \mathrm{s} = 9\ 192\ 631\ 770/\Delta\nu(^{133}\mathrm{Cs})_{\mathrm{hfs}}$. Mivel $\Delta\nu(^{133}\mathrm{Cs})_{\mathrm{hfs}}$ egy valóságos frekvencia, amely a ^{133}Cs atom jellemzője, és 9 192 631 770 egy közönséges szám, ebből az összefüggésből látható, hogy a másodperc teljesen meghatározott, és a laboratóriumban megvalósítható, ha a $\Delta\nu(^{133}\mathrm{Cs})_{\mathrm{hfs}}$-re egy pontos értéket fogadunk el.

Az UT skálák további fejlődése és az Univerzális Koordinált Időskála (UTC)

Az UTC időskála atomi időskáláról volt származtatva, de a következőképpen követte az UT 2 időskálát:

- Minden év elején meghatározták, hogy az „UTC" óra mennyivel fog késni az ideális cézium-órához képest (az UT2 követéséhez az órának késnie kell). Ez a késés $(1{,}5\ldots3) \times 10^{-8}$ volt relatív értékben, azaz mintegy évi 0,5…1 másodperc.
- Abban az esetben, ha a Föld forgásának szabálytalansága miatt az UTC és az UT 2 közötti eltérés meghaladta a 0,1 másodpercet, akkor ezzel az értékkel alkalomszerűen „léptették" a skálát.

Ez az eredeti UTC skála 1960-tól 1971-ig volt használatban. Fenntartását nagyon megnehezítette a rendszeres, és évenként változó mértékű késés, ezért 1972. január 1-jétől új UTC rendszert vezetettek be. Ennek az volt a lényege, hogy megszüntették a rendszeres késést. Az „új UTC óra" időalap-generátora azonos frekvenciával járt, mint a TAI skála szerinti cézium-óra időalap-generátora. Az UTC skálával követett UT skála az „új rendszerben" az eddigi UT 2 helyett az UT 1 lett, és a TAI és az UT 1 közötti eltérést 1 másodperces léptetésekkel, az úgynevezett szökőmásodpercek beiktatásával korrigálták[4]. A szökőmásodperc azonban egyaránt lehet pozitív és negatív, ezért az a perc, amelybe beiktatták, állhatott 59 vagy 61 másodpercből. Szökőmásodpercet évenként legfeljebb egyszer iktatnak be az időskálába, akkor, ha az új UTC és az UT1 eltérése meghaladja a 0,7 másodpercet. A legutóbbi szöktetés 2005-ben volt. Évente kétszer lehet szöktetni: december 31-én éjfélkor és június 30-án éjfélkor. Az előbbit eddig 13 alkalommal, az utóbbit 9 alkalommal végezték. Negatív szöktetés még nem volt. A rendszeres szöktetés azért szükséges, mert a Föld forgása szisztematikusan lassul, zömmel a Hold és a Nap árapálykeltő hatása miatt. A szöktetéseket az IERS [International Earth Rotation and Reference Systems Service] határozza meg és írja elő.

A cézium-óra

Viszonylag kevés nemzeti metrológiai laboratórium tudja az idő egységét a lehető legnagyobb pontossággal megvalósítani. Ehhez elsődleges frekvenciaetalonokat kell tervezni és megépíteni. Ezek a frekvenciaetalonok olyan frekvenciájú elektromos rezgéseket állítanak elő, amelynek a cézium 133 atom átmenetének a másodpercet definiáló frekvenciájával való függvénykapcsolata ismert. 1997-ben a legjobb nemzeti etalonok az SI másodpercet 2×10^{-15}.eredő bizonytalansággal állították elő.

Fontos megjegyezni, hogy a másodperc definícióját úgy kell érteni, mint a sajátidő (proper time) egységének a meghatározását, ami tehát csak a cézium atom mozgását magába foglaló kis térrészre vonatkozik[5]. Egy olyan laboratóriumban, ami eléggé kicsi ahhoz, hogy a

[4] Ez ugyanolyan eljárás volt, mint a szökőnap, február 29. beiktatása a naptárban.

[5] A sajátidő (angolul: proper time) a relativitáselmélet fogalma: az az idő, amit egy órával ugyanazon a helyen mérnek, ahol a megfigyelt rendszer van. A rendszer az órát is magába foglalhatja, úgy ahogyan egy emberi lény magába foglalja a maga biológiai óráját. Általánosabban megfogalmazva; az órát képezheti egy olyan periodikus fizikai, biológiai vagy kémiai folyamat, amely meghatározza a rendszer jellemző időskáláját. A sajátidő tehát a megfigyelés alatt álló rendszer tulajdonsága, és különbözik az úgynevezett „koordinált időtől", amely annak a belső periodikus folyamatnak az ideje, amit egy másik inercia-rendszerben elhelyezkedő, távoli óra mér. A speciális relativitás elmélete megadja az egzakt összefüggést a folyamat sajátideje és koordinált ideje között. Bármilyen legyen is azonban a belső folyamat periódusát mérő távoli óra tehetetlenségi (inerciális) rendszere, a sajátidőre mindig ugyanazt az eredményt kapjuk. Ez tehát az elméletnek egy invariánsa (ahogy annak lennie

gravitációs tér egyenetlenségei a másodperc megvalósításának bizonytalanságához képest figyelmen kívül hagyhatók legyenek, a sajátmásodperc az atomok sebességére alkalmazott, speciális relativisztikus korrekció után áll elő. A helyi gravitációs térre vonatkozó korrigálás nem elegendő.

Az elsődleges frekvenciaetalonok a nemzeti időszolgáltató laboratóriumok másodlagos időetalonjainak a kalibrálására is használhatók. Ezek általában a kereskedelemben kapható, rendkívüli hosszú idejű stabilitással rendelkező cézium-órák. Képesek a frekvencia értékét hónapokon keresztül 1×10^{-14}-nél nagyobb stabilitással megtartani, tehát igen jó időfenntartók. Frekvenciájuk relatív bizonytalansága 10^{-12} nagyságrendű. Az idő-laboratóriumok jó rövid idejű stabilitással rendelkező *hidrogén-mézereket* is alkalmaznak. Ezek a készülékek minden olyan felhasználási célra alkalmasak, ahol a stabil referenciát egy napnál rövidebb időtartamra kell biztosítani (a stabilitás 10 000 s időtartam alatt 1×10^{-15}). A hidrogén-mézereknek frekvencia-driftje van, ami akkor jelentkezik, ha átlagos frekvenciájukat néhány napon át a cézium-óráéval hasonlítják össze. A cézium-órákat és a hidrogén-mézereket gondosan szabályozott környezeti feltételek mellett kell működtetni.

Óra-összehasonlítások

A nemzeti metrológiai laboratóriumok általában több órát működtetnek. Ezek egymástól függetlenül járnak, és adataikat úgy kombinálják, hogy egész éven át fenntartott (perennial) időskálát alakítsanak ki. Ez a skála stabilabb és pontosabb, mint bármelyik egyedülálló óra. A laboratóriumban az időskála a helyi órák összehasonlításainak eredményein alapul, és bizonytalansága gyakran kisebb, mint 100 pikoszekundum. Ezeket a skálákat a *k* laboratórium TA (*k*) időskálájaként jelölik.

A nagyon távol levő laboratóriumokban működő órák szinkronizálása az idő metrológiájának egyik fontos feladata. Ehhez olyan pontos óra-összehasonlítási eljárások szükségesek, amelyeket a Földön bárhol és bármikor el lehet végezni. A probléma megfelelő megoldását GPS műholdas rendszer (Global Positioning System, Globális Helymeghatározó Rendszer) jelenti. Ez a rendszer huszonnégy nem-geostacionárius műholdból áll. Eredetileg helymeghatározásra szolgál, de rendelkezik azzal a különleges tulajdonsággal, hogy a műholdak időjeleket sugárzó cézium-órával vannak felszerelve.

Ezeket a jeleket a következőképpen használják: Két egymástól távol levő laboratórium óráját külön-külön összehasonlítják egy olyan műholdon levő órával, amely egyidejűleg mindkét laboratóriumból látható, és kiszámítják a különbséget.

A nemzeti metrológiai laboratóriumok olyan, GPS-el végzett időskála összehasonlításait, amelyek az UTC [és áttételesen a TAI] fenntartását célozzák, a BIPM szervezi. Ezek az összehasonlítások megszakítás nélkül, automatizálva történnek, előírt műholdvevőkkel, előírt időpontokban, előírt azonosítójú műholdak vételével, a BIPM-nek küldött adatsorok előírt adatformátumával. A feldolgozás miatt az adatok egyhónapos késéssel érkeznek vissza.

---

kell). A „koordinált idő” másodperc időegységét alkalmazzák mindkét idő kifejezésére, bár erre a koncepcióra nincs szükség.

A törvényes idő

A TAI-t közvetlenül nem terjesztik a mindennapi használat számára. A mindennap használható idő (amit rádión, a televízióban és telefonon közölnek) a már megismert Koordinált Univerzális Idő [Coordinated Universal Time (UTC)]. Az UTC a TAI-tól egész számú másodpercben, konkrétan -31 s-ben tért el 1997. július 1-jén. Ez a különbség 1 másodperces lépésekben módosítható, hogy fenntartsák az UTC egyezőségét a Föld forgása által meghatározott idővel úgy, hogyha egy évre átlagolják, akkor a Nap a greenwichi délkört az UTC-délben 0,9 másodpercen belül keresztezze. Ezen kívül a törvényes idő az országok többségében egész számú órával van eltolva (az időzónák és a téli/nyári időszámítás miatt). A nemzeti időszolgáltató laboratóriumok az UTC egy közelítését tartják fenn, amit a *k* laboratórium esetében UTC(*k*)-nak neveznek Az UTC(*k*)-k eltérése az UTC-től általában nem több mint a nanoszekundum néhány századrésze.

Köszönetnyilvánítás

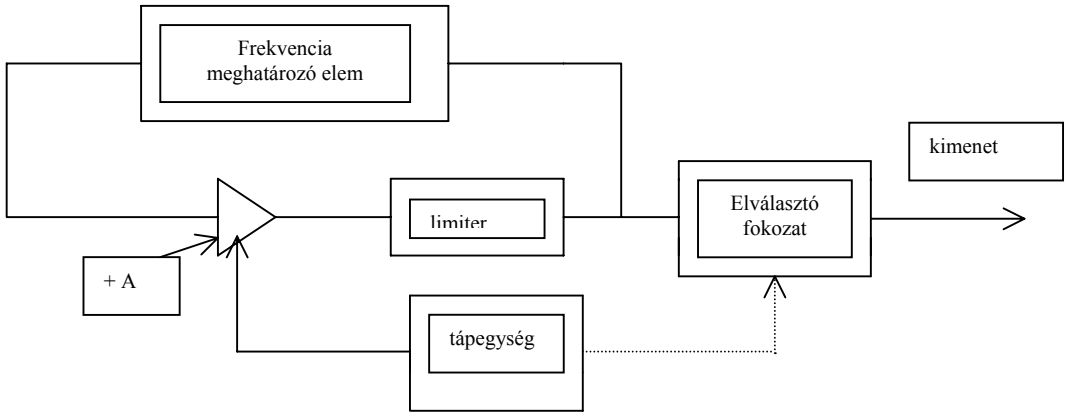
*Köszönetemet fejezem ki **Schneider Ferenc** kollégámnak amiért hozzájárulását adta tanulmányának a cikkben történő felhasználásához, és észrevételeivel segítette a kéziratban előfordult pontatlanságok és hibák kiküszöbölését.*

- vége -

A cikkben említett néhány elektronikus eszköz vázlatos ismertetése

Időalap-generátor (oszcillátor)

Az oszcillátor fő részei: a frekvencia-meghatározó elem, az erősítő, a limiter és az elválasztó fokozat és a tápegység. A rendszer a frekvencia-meghatározó elemen és a limiteren keresztül létesített pozitív visszacsatolás hatására, meghatározott frekvencián csillapítatlan rezgéseket végez. Az erősítő fenntartja a rezgéseket, a limiter határolja az erősítő kimenő jelét. A tápegység a rendszer veszteségeit pótolja. Az elválasztó fokozat biztosítja, hogy a külső terhelések ne zavarják a rendszer működését.



Kvarcoszcillátor

A kvarcoszcillátor frekvenciameghatározó-eleme mechanikai rezgést végző kvarckristály. A mechanikai rezgőrendszer az úgynevezett *piezoelektromos hatás* révén csatlakozik az oszcillátor elektronikus elemeihez. Ez a hatás abban áll, hogy ha egy alkalmasan csiszolt kvarclemezkét mechanikai hatás ér, akkor az ellentétes oldalaira felvitt, két fémbevonaton potenciálkülönbség lép fel. A fordított piezoelektromos hatásnál a fegyverzetekre adott feszültség mechanikai alakváltozást hoz létre. Ez a két hatás együttesen jelentkezik, és azt eredményezi, hogy a mechanikai rendszer a kvarcrezonátor elektromos áramkörében elektromos rendszerként viselkedik. (A fenti ábra *nem* vonatkozik az atomi oszcillátorokra, csak az LC, RC és kvarc oszcillátorokra.)

Atomi oszcillátorok

Max Planck 1900-ban kimutatta, hogy egy rendszer csak kvantumokban (adagokban) vehet fel vagy adhat le energiát. Az energiát a ν frekvenciájú *foton* szállítja. A foton által szállított energia, $E = h\nu$, ahol h a Planck-állandónak nevezett *hatáskvantum*.

1912-ben Bohr megalkotta atommodelljét, melyben az elektronok csak meghatározott pályákon keringhettek az atommag körül. A lehetséges pályákat kvantumszámok határozták meg. A kvantumszámok némelyikéhez szögnyomatékot (*spin*-t) és energiát lehetett rendelni. A nagyobb kvantumszámmal jellemzett elektronok nagyobb energiájúak.

Einstein 1917-ben publikálta, hogy az elektron egy alacsonyabb E_1 energianívóról egy magasabb E_2 nívóra úgy kerülhet, hogy elnyel egy $E_2 - E_1 = h\nu$ energiájú fotont. Ez az *abszorpció*. Az elektron az E_2 energiájú nívóról az E_1 energiájú nívóra *spontán emisszióval* mehet át, miközben egy $E_2 - E_1 = h\nu$ energiájú fotont kibocsát, elsugároz.

Az átmenet egy sajátos módon, az úgynevezett *stimulált emisszióval* is megtörténhet. Ennél az átmenetnél az elektron elnyel egy $E_2 - E_1 = h\nu$ energiájú fotont, ami megindítja az emissziót, de rögtön elsugárzik egy ugyanolyan $E_2 - E_1 = h\nu$ energiájú fotonnal együtt. A két fotonnak megfelelő rezgések koherensek. A stimulált emisszió tehát csak akkor jön létre, ha a beeső foton frekvenciája nagyon pontosan megfelel $E_2 – E_1$-nek. Minden olyan elemnek, amelyből a feni elven működő atomórát lehet gyártani [Cs, Rb, H] csak egy vegyértékelektronja van, és

ennek a kétféle spin-állása adja meg a két energiaszintet. A magas energiájú spinek fordulnak alacsony energiájú állapotba a stimulált emisszió révén. Az elektronburok jellemzése a vegyértékelektronok energiaállapotának (energiaszintjének) kvantumszámokkal való megadásával történik.

A *hiperfinom szerkezet* (az energianívók felhasadása) a mag + a teljesen betöltött elektronpályák és az elektron kölcsönhatása miatt jön létre. Külső mágneses tér alkalmazása esetén a hiperfinom szintek energianívói a mágneses kvantumszám lehetséges értékeinek megfelelően tovább hasadnak. Ez a *Zeemann-effektus*.

Forrásmunkák: a Nemzetközi Súly- és Mértékügyi Hivatal „A Nemzetközi Mértékegység-rendszer (SI)” című, angol nyelvű brosúrájának 2006. évi, 8. kiadása; a PTB etalonokról szóló 1983. évi kiadványa és Schneider Ferenc „Idő- és frekvenciamérés” című kézirata.