

## Fénysebességmérés szaggatott lézersugárral

A fény légüres térben való terjedési sebessége a fizika egyik legalapvetőbb állandója, melynek értéke minden tehetetlenségi vonatkoztatási rendszerben azonos, és meghatározása évszázadok óta a fizika tárgykörét képezi. Ezért a történelem során sokan és sokféleképpen próbálták meghatározni azt.

Az első fénysebesség mérési módszer *Galileo Galilei* (1564-1642) nevéhez fűződik, aki azt az időt akarta megmérni, mely ahhoz szükséges, hogy a fény két mérföldet (3,3 km-t) befusson, mivel a fény sebessége a megtett út és az ahhoz szükséges idő hányadosából számolható. A mérés sikertelennek bizonyult, mivel ilyen kis távolsághoz kicsiny időtartam tartozik, amely pontos megmérése akkoriban még lehetetlen volt.

Az első sikeres fénysebesség mérést gyakran *Olaf Römer* (1644-1710), dán csillagásznak tulajdonítják, aki a Jupiter holdjainak fogyatkozási idejét vizsgálta, ám elgondolásait pontos mérésekkel nem tudta megalapozni. Viszont helyesen levonta azt a következtetést, hogy a fény véges sebességgel rendelkezik. Módszere csillagászati méréseken alapszik, mivel nagy távolságokhoz nagy időintervallumok tartoznak, amelyek mérése jóval egyszerűbb. Römer csillagászati módszere a következő: megfigyeléseinket kezdjük abban a pillanatban, amikor a Föld a Nap és a Jupiter bolygó között található, ekkor megmérjük a Jupiter legbelső holdjának keringési idejét, vagyis a Jupiter árnyékából való két, egymás utáni kilépés közötti időt. A Jupiter-hold 103 fordulat megtétele után (fél év) a Föld a Nap ellenkező oldalára fog kerülni. Távcsővel megfigyelve a Jupiter-hold felkeltét, azt fogjuk tapasztalni, hogy a hold 1200 s-ot késik. Ez az idő a többlettávolság megtételéhez szükséges, ami megadja a fény vákuumban való terjedési sebességét. *Christiaan Huygens* (1629-1695), a holland tudós felhasználva Römer megfigyeléseinek eredményét, illetve a Földpálya átmérőjének akkoriban vélt értékét ( $\sim 3 \cdot 10^8$  km), a fény légüres térben való terjedési sebességét 240 000 km/s-ra becsülte.

A fény levegőben való terjedési sebességét Földi körülmények között először a francia *Armand Hippolyte Fizeau* (1819-1896) határozta meg 1849-ben. Fizeau mérései során egy tükörrendszert és egy gyorsan forgó fogaskereket használt, és azt találta, hogy a fény terjedési sebessége levegőben 315000 km/s. 1876-ban *Cornu* megismételte Fizeau kísérletét, és a fénysebességre 300400 km/s értéket kapott. Fizeau ötletét *Perrotin* továbbfejlesztette és 1902-ben méréseket végzett, ő úgy vélte, hogy a fény sebessége 299880 km/s.

A fizika történetében az egyik legnagyobb jelentőséggel bíró fénysebesség mérési kísérlet a francia fizikus, *Dominique Arago* (1786-1853) nevéhez köthető, aki olyan berendezést készített (forgótükör), amivel el lehetett dönteni, hogy a fény sebessége levegőben, vagy vízben nagyobb-e. A méréseket Fizeau, majd néhány hét elteltével *Léon Foucault* (1819-1868) végezte el. Az így kapott eredmény a fény hullámelméletét igazolta.

A másik, igen híres és pontos fénysebesség mérést 1926-ban *Albert Abraham Michelson* (1852-1931), amerikai fizikus és munkatársai végezték el. Az általuk használt berendezés az Arago által készítettnek egy továbbfejlesztett változata. A mért fénysebességérték 299796 km/s volt.

A modern és pontos fénysebesség mérési módszerek jelentős része indirekt mérésekre épül és a fény elektromágneses hullámtermészetét használja ki. Mikrohullámok üregrezonátorokban való sebességének a mérésével meg lehet határozni a fénysebesség értékét, hiszen ismert az elektromágneses hullám frekvenciája, mérve a hullámhosszat meg-

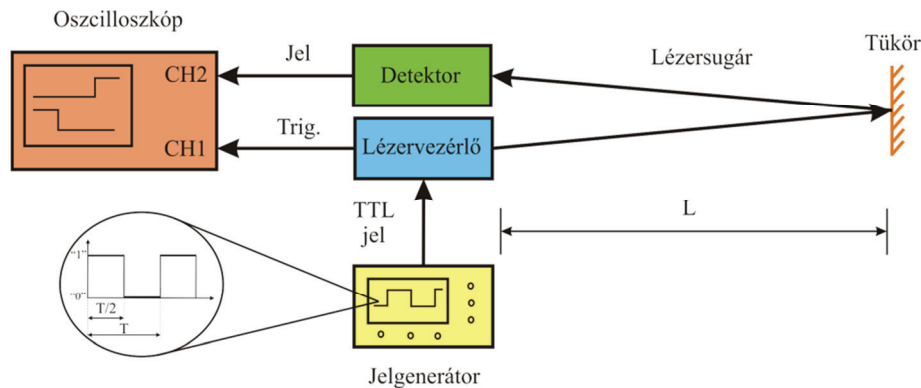
kapjuk a fény sebességét a vizsgált közegben. A mai, lézeres fénysebesség mérési módszerek java része a Foucault-féle forgótükros módszeren alapszik. Más módszerek a Fizeau-féle elképzelést veszik alapul, ahol a fogaskerék ún. Kerr-cellával van helyettesítve, így módon a fényút lecsökkenthető és a kísérlet laboratóriumi körülmények között is elvégezhető. A rendkívül pontos mérési módszerek a Michelson-féle interferométer segítségével végezhetőek, melyek az interferencia-jelenségen alapszanak, ahol ismert a lézerefény frekvenciája. Az interferenciakép segítségével meghatározható a sugárzás hullámhossza, ahonnan könnyedén kiszámolható a lézerefény terjedési sebessége. Más módszerek a számítógépek-nél elterjedt „ping” utasításon alapszanak. Ez esetben egy számítógépről különböző hosszúságú kábeleken (vagy vezeték nélküli hálózaton) küldenek egy adatsomagot egy *router*-nek, és mérik az oda-vissza út megtételéhez szükséges átfutási időt, amiből meghatározzák az elektromágneses hullámok terjedési sebességét.

Megemlítjük, hogy manapság a fény vákuumban való terjedési sebességének értéke *posztulált* és egyenlő  $c = 299\,792\,458$  m/s-al. Ezzel kapcsolatosan említésre méltó *Bay Zoltán* fizikus neve, aki 1965-ben azt tanácsolta, hogy célszerűbb a távolságegységet (a métert) a fénysebesség vákuumban mért értékére alapozni. 1983-ban az Általános Súly-és Mértékügyi Konferencia Párizsban tartott 17. ülésén elfogadták Bay Zoltán javaslatát, és megfogalmaztak egy megállapodást, miszerint: „A méter a fény által a vákuumban a másodperc  $1/299\,792\,458$ -ad része alatt megtett út hossza.”

Láthattuk a történeti áttekintő folyamán, hogy a fénysebesség mérési módszerek javarésze indirekt méréseken alapszik. Azaz nem a fény által megtett út és az ahhoz szükséges átfutási idő méréseiből határozzák meg a fény sebességét (direkt mérési módszer), hanem annak elektromágneses hullámtermészetét használják ki. A direkt módszer előnye, hogy jobban „szemlélteti, igazolja” a fény tényleges terjedési sebességét. Hátránya, hogy rövid távolságok esetén a fény átfutási idejének mérése meglehetősen nehéz, fejlett technológia létezését teszi szükségessé.

Az alábbiakban bemutatunk egy olyan, fénysebesség mérési módszert, mely segítségével direkt módon, laboratóriumi körülmények között megközelítőleg meghatározható a fény terjedési sebessége levegőben. A módszer elve könnyedén megérthető és a kísérleti berendezés relatív alacsony költségvetésből elkészíthető, amely lehetővé teszi kis távolságokhoz (néhány *m*) tartozó átfutási idők – didaktikai szempontból – kielégítően pontos mérését (néhány *ns*). Így módon e kísérlet akár középiskolai fizika tanórákon is elvégezhető.

A módszer elvét az 1. ábrát követve könnyedén megérthetjük. A jelgenerátoron beállítunk egy adott frekvenciájú négyszögjelet, amit egy lézervezérlőre csatlakoztatunk, így az általa kibocsátott lézerefény a beállított frekvencián szaggatott lesz. Például, ha a szaggatási frekvencia  $f = 100$  Hz, akkor a periódusidő (*T*) egyenlő a szaggatási frekvencia inverzével ( $T = 1/f$ ), vagyis 10 *ms* lesz. Tehát a lézervezérlő 5 *ms* ideig bocsájt ki fényt, majd az ezt követő 5 *ms*-ban nem. Ez a folyamat ismétlődik másodpercenként százszor. A lézerefény egy tükörbe verődik, ami a lézervezérlőtől *L* távolságra van elhelyezve, majd a detektorba jut. A detektor ezeket a fényimpulzusokat visszaalakítja elektromos négyszögjelekké, amiket az oszcilloszkóp CH2 csatornáján keresztül feldolgozunk. Ezzel egy időben a lézervezérlőbe küldött jelet az oszcilloszkóp CH1 kanálisára csatoljuk (trigger jel), amit összehasonlítunk azzal a jellel, amely lézerefénnyé, majd elektromos jellé alakulva a CH2-be érkezik.



1. ábra

*A fény levegőben való terjedési sebességének meghatározására szolgáló módszer elvi tömbvázlata [1].*

A CH2-n mért jel bizonyos idővel ( $\Delta t$ ) késni fog a CH1-hez képest, ami ahhoz szükséges, hogy a fény megtegye a  $2 \cdot L$  (lézervezérlő – tükör – detektor) távolságot. Figyelembe kell venni azt is, hogy az elektronikus alkatrészek és vezetékek is behoznak egy  $\tau$  késést a rendszerbe. Jelöljük  $t$ -vel a valós, oszcilloszkópról leolvasott időkésést, ami tartalmazza az elektronikus alkatrészekből adódó késést ( $\tau$ ) és a lézerfény által megtett úthoz ( $2 \cdot L$ ) tartozó időt ( $\Delta t$ ) is, tehát  $t = \tau + \Delta t$ .  $\tau$  értéke nem változik, mivel minden méréskor ugyanazokat a vezetékeket és berendezéseket használjuk, ezért ezt kiküszöbölhetjük, ha a méréseket legalább két különböző távolságra végezzük. Legyen a két különböző távolság  $L_1$  és  $L_2$ , akkor

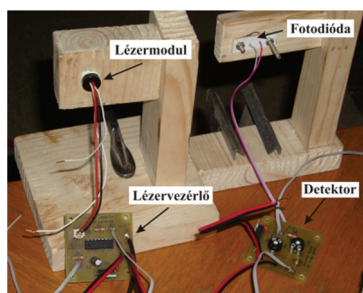
$$t_2 = \Delta t_2 + \tau = \frac{2L_2}{v} + \tau \quad \text{és} \quad t_1 = \Delta t_1 + \tau = \frac{2L_1}{v} + \tau.$$

Képezve e mérhető időkésések különbségét

$$2 \cdot (L_2 - L_1) = v \cdot (t_2 - t_1) \quad \text{adódik, ahonnan} \quad v = \frac{2 \cdot (L_2 - L_1)}{t_2 - t_1}$$

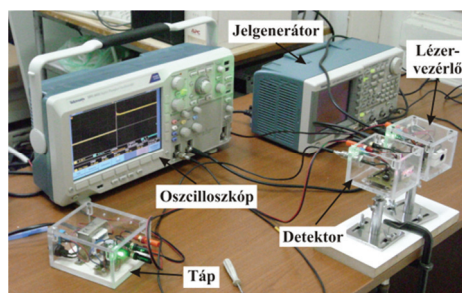
Megjegyezzük, hogy a valóságban a jelgenerátor által előállított négyzetjel nem rendelkezik ideális négyzetgörbével, mivel ún. *Fourier sorok*éből van „összerakva”. Ezért a mi esetünkben is a lézervezérlő bemenetére, illetve az oszcilloszkóp CH1 kanálisára csatolt jel sem rendelkezhet tökéletes négyzetgörbével. Valamint a detektor által szolgáltatott jel is torzul, mivel a lézervezérlő az elektronikai alkatrészek reakcióideje miatt nem tudja pillanatszerűen levágni a fényimpulzusokat, illetve a detektor sem tudja azokat tökéletesen visszaalakítani elektromos jellé. Ez azt eredményezi, hogy a CH2 csatornába érkező jel valójában trapéz alakú lesz, úgyszintén a CH1-en mért is, mivel azt a lézervezérlőről választjuk le (lásd később, 4. ábra). A mérések folyamán e rendellenességeket úgy küszöbölhetjük ki, ha minden méréskor az oszcilloszkóp érzékelési feszültség-szintje csatornáknak megfelelően ugyanarra az értékre van állítva. Ezt a szintet érdemes a négyzetjелеk magasságának a közepére állítani, vagyis a trigger jel esetében (CH1) 1,5 V körülire, míg a detektor jelnél (CH2) 2,5 V-ra, viszont e szintek legkedvezőbb értékeinek a megválasztása függ az adott jelek aktuális alakjától.

A mérések során folyamatosan fejlesztettük a kísérleti berendezést, (egy kezdetleges (dobozolatlan) és fejlesztett (dobozolt) változatát), melyet a fény levegőben való terjedési sebességének a meghatározására használtunk (2. és 3. ábra). A mérések javarészt szabad ég alatt végeztük, ezért időnként erősebb szélfújásokat is észlelhattünk. Minden mérés során az oszcilloszkópban a triggerelési feszültség szintet +1 V-ra állítottuk. A szaggatási frekvencia 10 Hz volt.



2. ábra

*A lézervezérlő és a detektor dobozolatlanul [1].*



3. ábra

*A lézervezérlő és a detektor dobozoltva [1]*

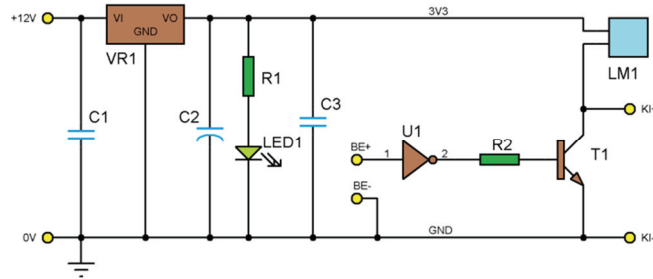
A fény levegőben való terjedési sebességére  $v = 2,188 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ -ot mértünk, míg a valós érték  $c = 2,997 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ , tehát a relatív hiba  $|c - v| / c [\%] \approx 27\%$ .

A hibák becslése nehéz feladat, mert számos olyan paraméterrel is számolnunk kell, melyek objektív meghatározása gyakorlatilag képtelenség (pl. hőmérséklet-, és légáramlat-változások kihatása az elektronikai egységekre, a környezeti rezgések, továbbá a tükrök és üvegorongok felületi tisztaságának a kihatása). Azon hibák, melyeket számszerűen figyelembe tudunk venni, azok a távolságmérés bizonytalanságából, illetve az oszcilloszkóp pontatlanságából adódnak, melyek becslése meglehetősen bonyolult, ezért nem részletezzük azokat.

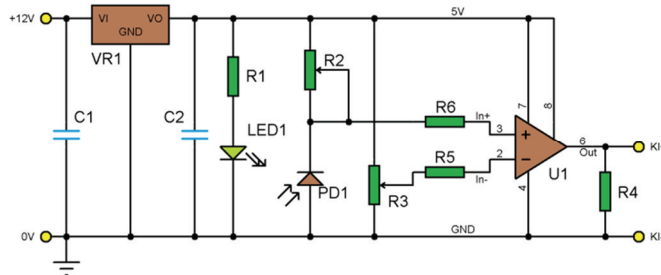
Megjegyezzük, hogy a mérések folyamán arra is kell figyelni, hogy a távolság ( $2 \cdot L$ ) *optimális* legyen, amit nagyban befolyásol a használt lézermodul. Ez azt jelenti, hogy nagy távolságok esetén a lézernyaláb keresztmetszeti intenzitás-eloszlása nem lesz egyenes, több maximumot tartalmazhat, ami azt eredményezi, hogy a kis rezgések miatt a detektor más és más pontokat fog észlelni. Ennek következtében változni fog a kibocsátott jel alakja. Kis távolságok esetén, ugyan a lézernyaláb intenzitás-eloszlása egyenletesebb, bár az átfutási ( $\Delta t_1, \Delta t_2$ ) idők meglehetősen lecsökkenhetnek és mérések csak igen jó minőségű oszcilloszkóppal lehetséges. Tehát meg kell találni azt az optimális távolságot, amelyre a legjobban kezelhető a kísérleti berendezés. Továbbá ajánlott az optikai pad használata, mivel a munkapad csekély elmozdulása a végeredmény drasztikus változásához vezethet.

Az általunk készített lézervezérlő kapcsolási rajzát a 4. ábra, míg a detektor kapcsolási rajzát az 5. ábra mutatja.

Összefoglalásként elmondhatjuk, hogy a fenti módszer segítségével laboratóriumi körülmények között, ha nem is pontosan, de nagyságrendileg meg tudjuk mérni a fény levegőben való terjedési sebességét.



4. ábra. A lézervezérlő kapcsolási rajza [1].



5. ábra. A detektor kapcsolási rajza [1].

A 4. ábrán használt jelölések és alkatrészek értékei a következők:

VR1 – 3,3 V-os feszültség stabilizátor.  
 Kondenzátorok: C1 = 100 nF, C2 = 2,2  $\mu$ F,  
 C3 = 100 nF  
 Ellenállások: R1 = 1,2 k $\Omega$ , R2 = 1,2 k $\Omega$   
 LED1 – Zöld LED  
 U1 – Fordítókapu: SN74AC14N  
 T1 – Tranzisztor: BFG540W  
 LM1 – Lézermodul: HLDPM12-655-10

Az 5. ábrán használt jelölések és alkatrészek értékei a következők:

VR1 – 5 V-os feszültség stabilizátor.  
 Kondenzátorok: C1 = 330 nF, C2 = 100 nF  
 Ellenállások: R1 = 1,2 k $\Omega$ , R4 = 10 k $\Omega$ ,  
 R5 = 1 k $\Omega$ , R6 = 1 k $\Omega$   
 Potenciométerek: R2 = 50 k $\Omega$ , R3 = 50 k $\Omega$   
 LED1 – Zöld LED  
 PD1 – Fotodióda: SFH2701  
 U1 – Műveleti erősítő: AD8000

### Felhasznált könyvészet

- [1] Máthé Levente, *Fénysebességmérés szaggatott lézergusárral*, Államvizsga dolgozat, BBTE, Kolozsvár, **2014**.
- [2] Néda Z., *A fényre szabott fizika*, Kolozsvári Egyetemi Kiadó, Kolozsvár, pp. 59-67, **2008**.
- [3] L. Essen, *The Velocity of Propagation of Electromagnetic Waves Derived from the Resonant Frequencies of a Cylindrical Cavity Resonator. Proceedings of the Royal Society of London A* **204** (1077), pp. 260–277, **1950**.
- [4] Néda Z., Szász Á., *Hálózati ping-pong – avagy a fény sebességének számítógépes mérése*, Fizikai Szemle, 2007/4. pp. 132-134. (**2007**).
- [5] Aoki, K; Mitsui, T. *A small tabletop experiment for a direct measurement of the speed of light. American Journal of Physics* **76** (9): pp. 812–815. (**2008**)

**Máthé Levente,**  
 Fizika Kar, Babeş-Bolyai Tudományegyetem, Kolozsvár

## Tények, érdekességek az informatika világából

*Közmondások programnyelven*

```
☞ /* A hazug embert hamarabb utoléri, mint a sánta kutyát */
  ▪ capturetime(human.type(LIAR)) <
    capturetime(dog.type(CRIPPLE))
☞ /* Kerülgeti, mint macska a forró kását */
  ▪ sideStep(cat.getWalkType(new Kása(HOT)));
☞ /* Aki másnak vermet ás... */
  ▪ Stack.push(someOneOther.getStack().madeBy());
☞ /* A napra lebet nézni de rá nem */
  ▪ SUN.CanView := true;
  ▪ HE.CanView := false;
☞ /* Amilyen az adonisten, olyan a fogadisten */
  ▪ setAcceptGod(getGiveGod());
☞ /* Madarat tolláról, embert barátjáról */
  ▪ Bird.Type := Bird.feather;
  ▪ Human.Type := Human.friend;
☞ /* Éhes disznó makkal álmodik */
  ▪ pig.setType(HUNGRY);
  ▪ pig.setDream(MAKK);
☞ /* A részvétel a fontos... */
  ▪ Winnig.Priority := 0;
  ▪ Attendance.Priority := CONST_HIGH;
☞ /* A szomszéd kertje mindig zöldebb */
  ▪ const bool compareGreenness(Grass* grass)
  ▪ {
  ▪   if (grass.getOwner() == NEIGHBOUR) return true;
  ▪ }
☞ /* Lassan járj... */
  ▪ PassedDistance := PassedDistance + (1/WalkSpeed);
☞ /* Okos enged, számár szenved */
  ▪ if Human.Type = CONST_SMART then Release;
  ▪ if Human.Type = CONST_DONKEY then Suffer;
```

## Fotorealistikus számítógépes grafika

A *generatív számítógépes grafika* a képi információ tartalmára vonatkozó adatok és algoritmusok alapján modelleket állít fel, képeket jelenít meg (*renderel*). Ide tartozik a speciális effektusok előállítás, vagy az animáció is, amely a generált grafikát az időtől teszi függővé. Általában két- (2D) vagy háromdimenziós (3D) grafikus objektumok számítógépes generálását, tárolását, felhasználását és megjelenítését fedi a fogalom.

Nyilvánvaló, hogy az ember által készített mesterséges objektumok könnyűszerrel modellezhetőek fotorealistikusan számítógépen, hisz nem egy már eleve számítógép segítségével volt megtervezve. A nagy kérdés a természet alkotta tájak, élőlények, kövek, sziklák stb. modellezése. Ebben nagy segítségünkre vannak a fraktálok.