

Elektromágneses hullámok terjedési sebességének mérése levegőben

Dombi András

Babeş-Bolyai Tudományegyetem, Fizika Kar, Fizika - Informatika szak, 3. évfolyam

Témavezetők:

Dr. Néda Zoltán egyetemi professzor

Babeş-Bolyai Tudományegyetem, Elméleti fizika tanszék

Tunyagi Artúr poszt-doc

Babeş-Bolyai Tudományegyetem, Elméleti fizika tanszék

XII. Erdélyi Tudományos Diákköri Konferencia

Kolozsvár, 2009. május 15–17.

Kivonat:

Az elektromágneses hullámok terjedési sebessége légüres térben a fizika egyik legalapvetőbb állandója. Ezen értéknek a vonatkoztatási rendszerétől való függettlensége képezi a modern relativitáselmélet alapját. Az elektromágneses hullámok levegőben való nagy terjedési sebessége következtében ($c \approx 3 \cdot 10^8$ m/s) és a detektáló illetve kibocsátó berendezések viszonylag nagy reakcióideje miatt direkt módszerekkel nagyon nehezen mérhető. A jelen dolgozatban egy általunk épített adó-vevő berendezést mutatunk be, melynek segítségével lehetővé válik ezen alapvető sebesség értékének a direkt megbecslése. A módszer egyszerű, és a vezeték nélküli számítógépes hálózatokon használt "ping" utasítás protokolljához hasonló. A számítógépes mérésünk alapelve akár liceumi szintű fizikatudással is megérthető.

Tartalomjegyzék:

Bevezető.....	2
Ötlet.....	3
Módszerek.....	5
Gondok és kiküszöböléseik.....	7
Eredmények	8
Következtetések	10
Szakirodalom	11

Bevezető

A fény terjedésének a megértése, illetve terjedési sebességének a mérése egy nagyon régi tudományos probléma. A fény különböző anyagokban terjed, és anyagtól függően a sebessége is különböző lehet. Viszont a fény légüres térben való terjedési sebessége kitüntetett jelentőséggel bír. Ez nyilvánvalóvá válik a speciális relativitás keretein belül, ahol ennek értéke meghatározza a különböző tehetetlenségi vonatkoztatási rendszerekben mért koordináták közti kapcsolatot.

A történelem során több elképzelés is született a fény terjedésének mivoltáról. Míg az ókori görög filozófusok szerint a fény pillanatszerűen terjed, vagyis egy tetszőleges távolság megtételéhez nincs szüksége a fénynek időre, addig a XVII. század körül már kezdett teret hódítani az a nézet, miszerint a fény vákuumban való terjedési sebessége egy véges érték [1]. Az első fénysebesség-mérési kísérletet Galileo Galilei végezte. Segédjét egy közeli dombra küldte egy letakart lámpával. Amikor Galilei jelt adott egy másik lámpással, a segédnek viszonznia kellett a jeladást. Ebből helyesen azt a következtetést vonta le, hogy a fény terjedési ideje a két domb között jóval rövidebb az emberi reakcióidőnél.

Az első sikeres fénysebesség-meghatározás Olaf Röemer csillagász nevéhez fűződik, aki a Jupiter Ganimesz holdjának fedési idejére végzett megfigyeléseket. Mivel a Föld, a Jupiter és a Ganimesz közelítőleg egy síkban keringenek, megtehetjük, hogy méréseinket abban a pillanatban kezdjük, amikor a Föld éppen a Jupiter és a Nap között van. A Ganimesz kb. 7.155 nap eltelte után rendszeresen a Jupiter árnyékába lép. 25 egymást követő árnyékba lépés után, a Föld-Jupiter távolság maximális lesz. Röemer elvárásai alapján a 26. árnyékalépésnek 25 x 7.115 nap után kellett bekövetkeznie. Azonban a megfigyelései alapján 1200 másodpercnyi késést vett észre. Ezt helyesen a fény véges terjedési sebességének tulajdonította, és számításai szerint 2.4×10^8 m/s értéket kapott.

Földi körülmények között először Arman Fizeau határozta meg a fény sebességét. Ő egy gyorsan forgó fogaskereket és egy tükörrendszert alkalmazott, és pontosabb eredményt kapott. Kísérlete alapján a fénysebesség 3.14×10^8 m/s [2].

Az alábbi táblázatban megtalálhatunk néhány értéket, melyek mutatják, hogy a

fénysebesség mérésének pontossága hogyan változott az évek során:

Év	Kísérletet végezte	Kísérleti módszer	Eredmény (10 ⁸ m/s)	Relatív hiba (%)
1600	Galileo	Lámpások	"Fast"	
1676	Röemer	Jupiter holdja	2.14	28
1729	Bradley	Fényaberráció	3.08	2.70
1849	Fizeau	Fogaskerék	3.14	4.70
1879	Michelson	Forgó tükrök	2.9991	400 x 10 ⁻⁶
	Michelson	Forgó tükrök	2.99798	18 x 10 ⁻⁶
1950	Essen	Mikrohullamok	2.997925	0.1 x 10 ⁻⁶
1958	Froome	Interferométer	2.997925	0.1 x 10 ⁻⁶
1972	Evenson et al.	Lézer	2.997924574	2 x 10 ⁻⁹
1974	Blaney et. al	Lézer	2.99792459	3 x 10 ⁻⁹
1976	Woods et al.	Lézer	2.997924588	3 x 10 ⁻⁹

Ezen értékek nagyságából azonnal belátható, hogy a hétköznapjainkban előforduló sebességek nagysága elhanyagolhatóan kicsi a fénysebességhez képest, tehát ilyen körülmények közt nyugodtan alkalmazhatjuk a Galilei féle transzformációkat, viszont nagy sebességek esetén (gyors elemi részecskék, kozmikus testek, stb.) a fénysebesség véges értékéből adódóan az ezen alapuló Lorentz-transzformációkat alkamazzuk.

A fénysebesség-mérési módszerekkel sajnos még egyetemen sem találkozunk, tehát csak elhisszük, hogy a fény úgy terjed, és olyan gyorsan, ahogy azt elmondják. Líceumi szinten, meg végképp szóba sem jöhet egy fénysebesség-mérési kísérlet. Iskolai körülmények közt nem lehetne megismételni egy hasonló kísérlet elvégzését. Muszáj azonban megértenünk, hogy a fénysebesség egy nagyon fontos fizikai mennyiség, amelynek döntő szerepe van a modern fizika logikájának felépítésében, a tér és az idő fizikai értelmezésében. Ezen mennyiség mérése lényeges ahhoz, hogy úgymond tapasztaljuk, és ne csak elhiggyük a fénysebesség értékét.

Ötlet

A mi ötletünk a fénysebesség mérésére alapjaiban egyszerű, könnyen megérthető, és akár ismételhető líceumi fizikaórákon is. Egy ehhez hasonló kísérletet végzett már Szász Ágota (Bolyai Farkas Elméleti Líceum, Marosvásárhely, Románia), aki a legtöbb

operációs rendszerben megtalálható ping utasítás segítségével optikai kábelekben nagyon jó eredményeket kapott (3.05×10^8 m/s) [3]. Ennek a kísérletnek a hátránya, hogy az optikai kábelek nem igazán elterjedtek, és nem feltétlenül elérhetőek egy líecumi fizikatanár számára. Emellett nem a levegőben való terjedési sebességét mérik a fénynek.

Ezeket kiküszöbölve született meg az ötlet, hogy hasonló módon végezzük el a kísérletet, de kábel nélküli hálózatokban. Ezzel megoldódik az a gond, hogy nem levegőben terjednek az elektromágneses hullámok, mert így most a terjedési közeg mindenképp a levegő lesz, emellett a wireless routerek elterjedése miatt a felhasznált berendezéshez is könnyebben hozzá lehet férni. A fénysebesség méréséhez így csak egy laptop, egy router és egy módosított ping utasítás szükséges.

A laptop, amit használtunk a kísérlet során egy Asus EEE PC 900HA, míg a router egy Asus WLGC 520-as volt.

A ping a legtöbb operációs rendszerben (Windows, Linux, Unix) működő egyszerű utasítás, amellyel egy másik számítógép hálózati elérhetőségét tesztelik. Ha a csomag megérkezik, a másik gép válaszol, és megjelenik, hogy mennyi a csomag kétirányú átfutási ideje a két számítógép között. Hogy pontosabb eredményeket kapjunk, Máté Gabriell mesteri hallgató segítségével egy programot írtunk, mely számunkra használhatóbb, mint a már meglévő ping utasítás, mert más protokollt használ. Ez Java-ban van megírva, és Eclipse alatt futtattam. Az egyszerűség kedvéért ezután az ezzel a programmal történő utasítást nevezem ping-nek. Pontosabban abban különbözik a mi pingünk az eredetitől, hogy ebben a kapcsolatteremtésnek a router és a laptop között csak az úgynevezett “kézfogás” része maradt meg, ami azt jelenti, hogy csak azt figyeli a program, hogy tud-e kapcsolatot teremteni a routerrel, és amikor az válaszol, hogy igen, vagyis a kapcsolatteremtés megtörtént, zárja is a kapcsolatot. Közben a kapcsolatkerés és a kapcsolatzárás közt eltelt időt rögzíti nanoszekundum pontossággal.

Ez a programrészlet, mely az eltelt időt számolja:

```
start = System.nanoTime();
socket.connect(sockaddr,t_out);
time = System.nanoTime() - start;
socket.close();
```

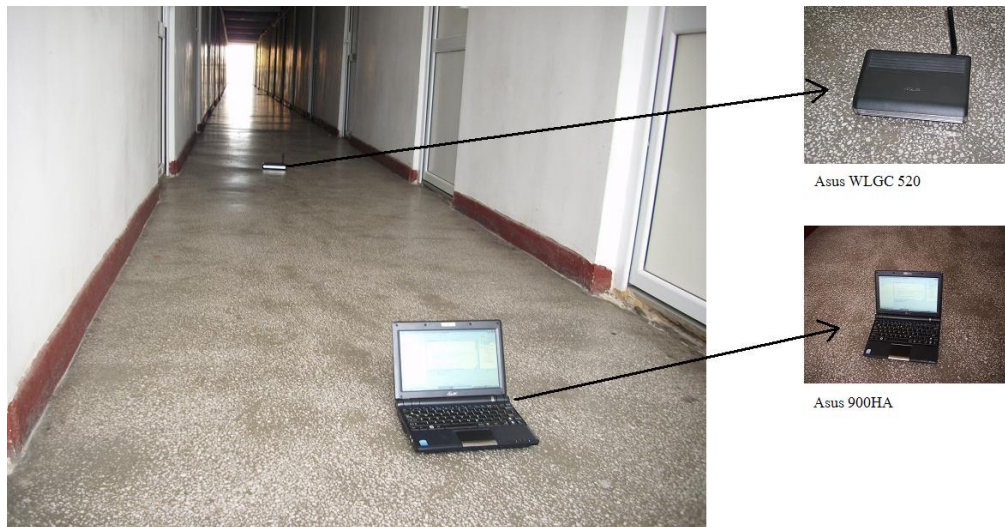
Indításkor 3 paramétert kell megadni a programnak, a router IP címet, a port számát, amit használni fogunk, és egy timeout-nak nevezett időt.

Ez a programrészlet a kezdeti paraméterekkel:

```
final static byte[] ipaddr = {(byte)192,(byte)168,(byte)2,(byte)1};  
private final static int port = 80;  
private final static int timeout = 20;
```

Az IP cím segítségével címezzük a kapcsolatteremtési kérést, a port szám szükséges, hogy lefoglaljuk az erre szánt portot, míg a timeout segítségével nem kell várjunk az örökkévalóságig, hogy a router válaszol-e vagy nem. Hiszen ha a timeout időn belül nem kaptunk választ, akkor azt már nem várjuk tovább, és újra próbálkozunk. Ennek a programnak egy másik nagy előnye, hogy módosítható olyan formában is, hogy több ping összidejét számolja, és csak akkor rögzíti az adatokat, ha egymás után az előre megadott számú pingek mindegyike elérte a célt.

Gyakorlatilag úgy áll össze a kísérlet, hogy egymástól egy előre meghatározott távolságra elhelyezzük a routert és a laptopot, majd csatlakozunk a router hálózatára, elindítjuk a programunkat, és várjuk, hogy gyűljenek az adatok.



1. ábra. A kísérleti berendezés

Módszerek

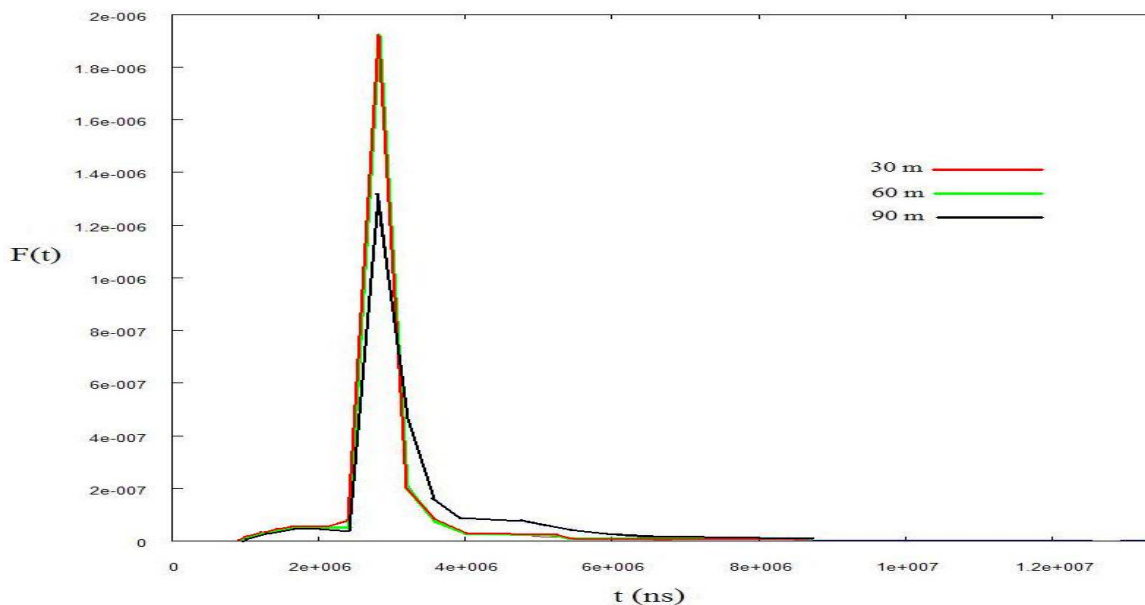
A kísérletezés alatt meg kellett határoznunk, hogy milyen körülmények mellett, illetve a program milyen beállításainak a hatására tudunk optimálisan mérni ezzel a

berendezéssel. A lényeges szempontok amiket néztünk, hogy mindenképp elég sok adatunk kell legyen ahhoz, hogy azokat majd statisztikai számítások során használhassuk, és emellett nyilván ne csak mennyiségileg, de minőségileg is használható adataink legyenek.

Különböző távolságokon végeztem méréseket, melyeket összehasonlítottam, az ezek közti különbségekből számítva fénysebességet.

Az adatok rögzítése után két különböző módszerrel dolgoztam fel az adatokat. Az első módszernél a következőket tettem:

A legkisebb, és a legnagyobb mért idők közti részt felosztottam egyenlő szélességű intervallumokra, majd azt vizsgáltam, hogy melyik intervallumba hány érték esik. Ezután minden így kapott értéket elosztottam az intervallum szélességével, és az összesen mért értékek számával. Így normált függvényt kaptam.

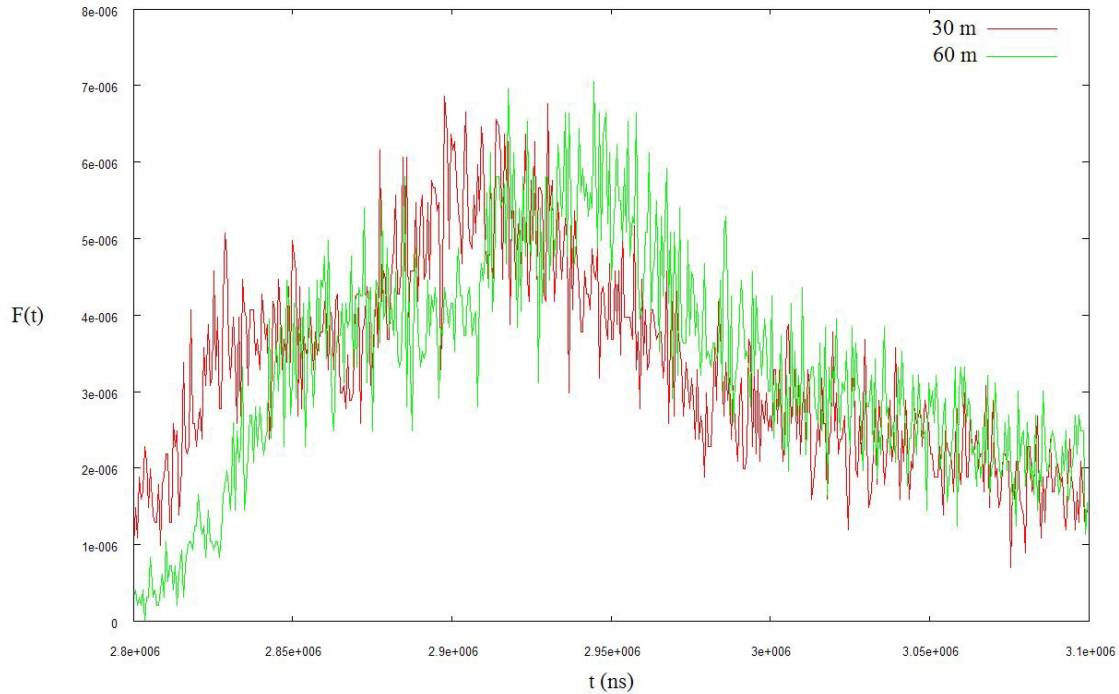


2. ábra. Három különböző távolságra számolt normált függvény ábrázolása.

Ezután a Grace nevű programmal Linux operációs rendszer alatt a már normált függvényemet integrálva, egymástól megkülönböztethető görbékkel lehetett észrevenni. Ezek eltolódásából számítottam a már említett különbségeket, illetve a fénysebességre kapott értéket.

A második módszer:

Ugyanazt a normálási módszert alkalmazva mint az előző esetben, a csúcsok körül is kiválasztottam egy időintervallumot, melyet több kis egyenlő széles intarvallumra osztva- ugyanúgy, ahogy az előző alkalommal, azt számoltam, hogy melyik intervallumba hány érték esik.



3. ábra. Két különböző távolságra számolt normált függvény csúcsainak ábrázolása

Utána ugyancsak a Grace-ben folytattam ezen adatok formázását is. Itt viszont azt csináltam, hogy kiszámoltam az átlagértékét a különböző távolságon kapott eredményeknek és azok különbségéből határoztam meg a fénysebességet.

Gondok és kiküszöböléseik

Több különböző formájában próbáltam ezt a ping utasítást, amíg megtaláltam a számomra legoptimálisabb formáját. Első ötletünk alapján csak akkor rögzítettem egy adatot, ha 100 egymás utáni ping sikeres volt, és azoknak az összeidejét vettem figyelembe. Ezzel az volt a gond, hogy sok időt vett igénybe. Egy jó statisztikához szükséges mennyiségű adat kb. 12 óra folytonos pingelés alatt gyűlt össze.

Mivel nem csak házon belül szeretnénk volna vizsgálni ezt a módszert, minden

szabadban végzett mérésnél csak 10 ping összidejét számolta a program. A szabadtéri mérések alatt egy érdekes, de ugyanakkor nagyon bosszantó külső tényezőt tudtunk megfigyelni, ami teljesen elrontotta a méréseink helyességét. Ez a kinti hőmérséklet. Összehasonlíthatatlan eredményeket kaptam, ha napon, vagy éppen borús időben mértem. Tudományosabban fogalmazva: a normált függvényeink ábrázolásánál látható grafikonok a hőmérséklet függvényében össze-vissza tolódtak egymástól. Tehát újra bekerült a négy fal közé a kísérlet. Több óra mérégetés után észre kellett venni, hogy nem csak a kinti hőmérséklet, hanem a router belső hőmérséklete is elrontja a statisztikákat. Ez megfigyelhetővé vált akkor, amikor 90, 60, majd 30 m távolságokban mértem ebben a sorrendben, és rossz irányba tolódtak el a grafikonok. Ezt is ki kellett küszöbölni, így a pingek száma egyre csökkent. Ez azért előnyös, mert alig 15-20 perc szükséges ahhoz, hogy elég mennyiségű adatot gyűjtsünk, hogy dolgozni tudjunk továbbra is velük. Ez jó, mert így az egymást követő mérések alatt magában a routerben sem lehet túl nagy hőmérséklet-különbség. A pontosabb mérések érdekében először hagytam a rendszert pingelni egy ideig, majd miután elért egy bizonyos hőmérsékletet, csak azután kezdtem a tulajdonképpeni méréseket.

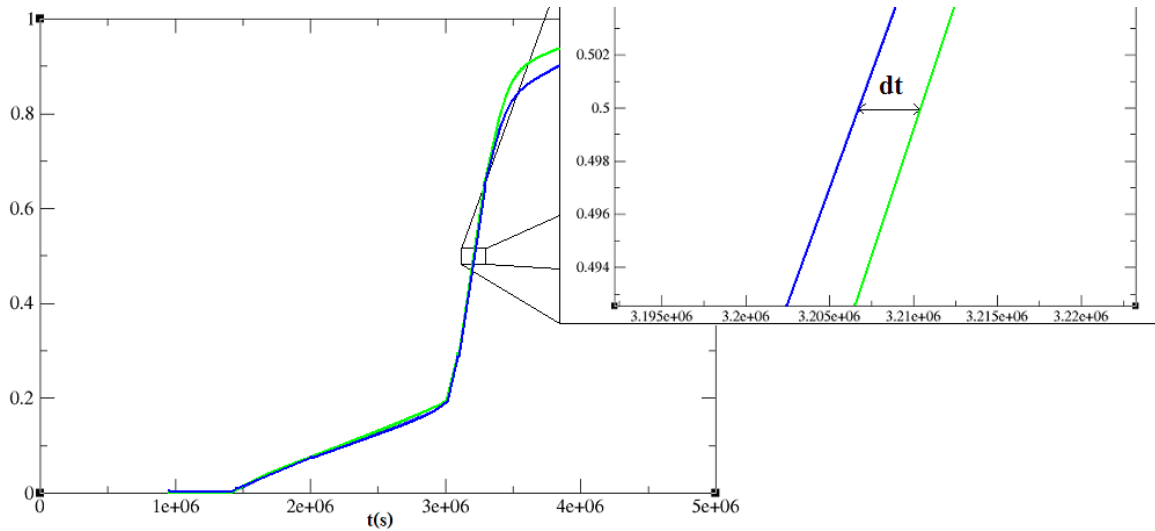
Mivel azt tapasztaltam, hogy a mérési eredményeket elrontja, ha valaki járkal a router és a laptop között miközben működik a program, ezért egy olyan hely kellett, ami elég hosszú több mérés elvégzéséhez is, nem szabadtéri, és nem is járkalnak majd a mérések közben. Erre tökéletesnek bizonyult a Babeş-Bolyai Tudományegyetem épülete este 8 óra után. A legjobb méréseket ott végeztem.

Eredmények

Első méréseim eredményei nagyon pontatlanok voltak, sőt, bizonyos esetekben, amikor különböző tényezők bezavartak, teljesen értelmetlen eredményeket adtak a számítások. Viszont ahogy a mérési és feldolgozási módszereket finomítottam, egyre jobban megközelítettem a fénysebesség elfogadott értékét.

Ahogy már a módszereknél leírtam, két különböző módon próbáltam meghatározni a fénysebességet a kapott adatokból. Most mindkét módszerre adok egy konkrét példát.

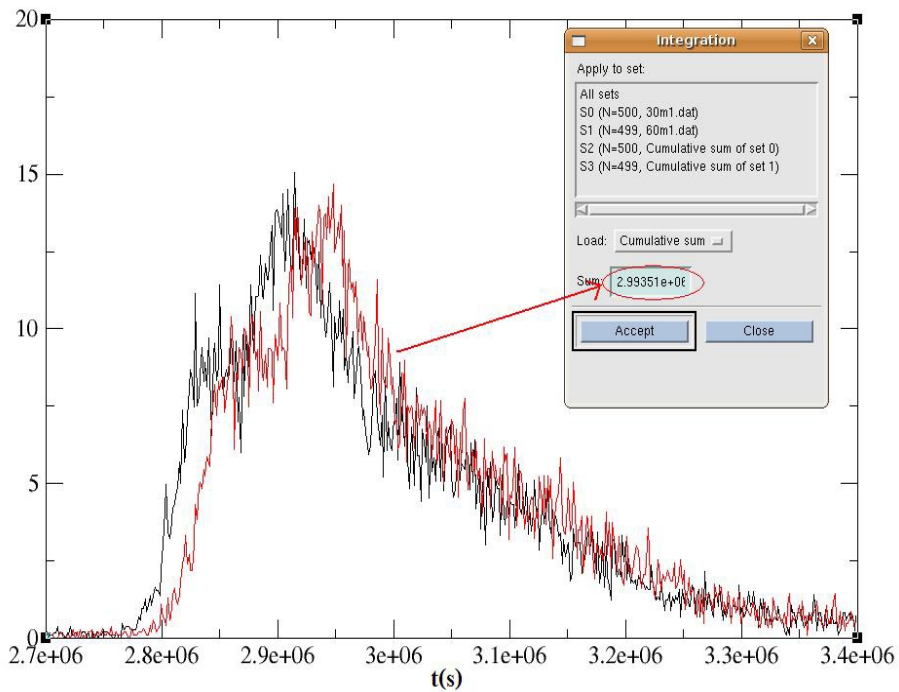
Első példa legyen a görbék eltolódásának módszere.



4. ábra. Időbeni eltolódás

Ahogy az ábrán is látszik, itt a “dt” időkülönbség a fontos. Ez egy 30, illetve egy 60 m-es távolság közti időbeni különbséget jelent. Itt a konkrét értéke $dt = 10^6 \times (3.21039 - 3.20681)$ ns. Ez azt jelenti, hogy 60 méter utat a fény mennyi idő alatt tett meg a méréseim alapján. Eszerint a fény sebessége 1.7×10^7 m/s.

Második példa tehát az átlagszámításra vonatkozik.



5. ábra. Átlagérték számítás

Itt miután a már normált függvényeket integráltam, hogy megkapjam az átlagértékeket, a két különböző távolságra kapott értékek különbségéből számítom ki újra a fénysebességet. Ennél a példánál maradva számítunk egy „dt” időkülönbséget, ami itt is azt adja majd meg, hogy a fénynek mennyi időre volt szüksége ahhoz, hogy a 30, illetve 60 méter közti oda-vissza utat megtegye. Itt a számítások:

$$dt = 10^6 \times (2.99351 - 2.98909) \text{ ns}$$

$$dx = 60 \text{ m}$$

Ezekből következik, hogy akárcsak az előbb, a fénysebességre sem kapunk pontos értéket. Ebben az esetben $1.36 \times 10^7 \text{ m/s}$ a számítások eredménye. Alább egy táblázatban feltüntettem a legjobb 5 eredményt, illetve azt is, hogy melyik módszerrel számítottam.

Módszer	Eredmény (10^8 m/s)
átlagszámítás	0.12
eltolódás	0.07
eltolódás	0.26
eltolódás	0.16
átlagszámítás	0.13

Következtetések

Ahogy a számításokból és a fenti táblázatból is látni lehet, nem a fénysebességhez közeli értéket kaptunk. Ha a fenti eredmények átlagát veszem, ami kb. $0.15 \times 10^8 \text{ m/s}$, akkor nagyjából a fénysebesség 20-ad része jön ki.

Sajnos úgy tűnik, hogy ezzel a módszerrel nem lehet pontosan kimutatni a fénysebesség értékét. Annyi látszik ugyan az eredményekből, hogy nagyon nagy érték, és annyira nagy, hogy a hétköznapiakban ehhez közelítő sebességekkel sem találkozunk, viszont tudományos mérésekhez nem megfelelő ez a berendezés.

Előnyei tehát a kísérletnek, hogy gyors, nagyjából egy fél óra alatt két különböző távolságra már elég adatot lehet szerezni ahhoz, hogy a számításokat el lehessen végezni, és emellett az egyértelműen látható, hogy nagyon nagy érték még ezek alapján is.

Hátránya, hogy pontosan nem tudtam vele meghatározni a fénysebesség értékét, annak ellenére, hogy sok különböző környezetben és a programnak több formájával is próbálkozva végeztem méréseket.

Szakirodalom

1. Nédá Zoltán, 2007, "A fényre szabott fizika"
2. H. Fizeau, 1851, "Sur les hypothèses relatives à l'éther lumineux"
3. <http://www.phys.ubbcluj.ro/~zneda/ping.html>