

B O K O R   N Á N D O R  
**TÉRIDŐ-GEOMETRIA**



B O K O R   N Á N D O R

---

# TÉRIDŐ-GEOMETRIA

---

Négydimenziós kalandok 18 éven felülieknek



**TYPOTEX**

A kötet megjelenését a Magyar Tudományos Akadémia és a  
könyvkiadói program keretében a Nemzeti Kulturális Alap  
támogatta.



Nemzeti  
Kulturális  
Alap

© Bokor Nándor, Typotex, Budapest, 2023  
Engedély nélkül semmilyen formában nem másolható!

Lektorálta: Szabados László

ISBN 978 963 493 247 5

Kedves Olvasó!

Köszönjük, hogy kínálatunkból választott olvasnivalót!

Újabb kiadványainkról és akcióinkról a [www.typotex.hu](http://www.typotex.hu)

és a [facebook.com/typotexkiado](https://www.facebook.com/typotexkiado) oldalakon értesülhet.

Typotex Kiadó

Alapította Votisky Zsuzsa, 1989

A kiadó az 1795-ben alapított Magyar Könyvkiadók  
és Könyvterjesztők Egyesülésének tagja.

Felelős kiadó: Németh Kinga

Felelős szerkesztő: Szabó Mihály István

Tördelés: Szabó Attila József

Borítóterv: Somogyi Péter

Készült a Multiszolg Bt. nyomdájában

Felelős vezető: Kajtor Bálint

# TARTALOM

Bevezető	7
1. A fény legfurcsább tulajdonsága	11
2. Események, megfigyelők	23
3. A téridődiagram	32
4. „Pontosan akkor, amikor...”	47
5. Meghalhatunk-e, mielőtt megszületünk?	53
6. Milyen gyors az űrexpressz?	58
7. Időtágulás, hosszrövidülés	65
8. A tengelyek kalibrálása	80
9. A Doppler-hatás	84
10. A Lorentz-transzformáció	90
11. Időszerű, térszerű, fényszerű	103
12. Hogyan mérünk hosszúságot a téridőben?	115
13. Időzített bomba a Naprendszerben	121
14. Egy halászlegény, három űrutazó és a maximális öregedés elve	128

15. Lucky Luke és a tachion antitelefon paradoxon	145
16. Mennyi ideig tart kényelmesen eljutni százmillió fényév távolságra?	154
17. Akhilleusz és a teknősbéka a világűrben	173
18. Egy ütközés története a klasszikus fizika szerint	188
19. Az ütközés története helyesen	200
20. Az impulzus	213
21. Az energia	224
22. Az energia-impulzus négyesvektor	235
23. Elektron, foton, tachion	245
24. Ütközések története energia-impulzus diagramon	258
25. A fotonrakéta	273
26. Miért nő egy test tömege, amikor melegítjük?	283
27. A gravitációs erő nem létezik	294
28. A majdnem-ekvivalencia elve	305
29. Sík és görbült felület, sík és görbült téridő	311
Köszönetnyilvánítás	330

# BEVEZETŐ

Ennek a könyvnek nagy része a *speciális relativitáselméletről* szól, az utolsó három fejezetben pedig az *általános relativitáselmélet* alap gondolatát ismertetem meg az olvasóval. Ennek előrebocsátása után magyarázatot igényel a könyv címe, amelyben a *speciális, általános és relativitáselmélet* szavak egyike sem szerepel.

A *relativitáselmélet* szerencsétlen és félrevezető elnevezés. Arra a felfedezésre utal, hogy vannak olyan fizikai mennyiségek – például egy focimeccsen Cristiano Ronaldo két feje között eltelt időtartam, illetve távolság –, amelyek viszonylagosak, „relatívak”, tehát amelyeket egymáshoz képest mozgó megfigyelők más-más számértékűnek mérnek. Az első baj ezzel az, hogy ugyanakkor olyan fizikai mennyiségek is vannak – például Cristiano Ronaldo öregedése a két fejes között, vagy sportkocsijának tömege –, amelyek *nem* relatívak, hanem *invariánsak*, azaz amelyeket minden megfigyelő *ugyanakkora* számértékűnek mér, akárhogy is mozognak egymáshoz képest, és ez legalább olyan fontos felfedezés. A második és talán még alapvetőbb probléma a relativitáselmélet elnevezéssel az, hogy az elméletnek nem az alapfeltevéseire utal, hanem csupán azok folyományaira, következményeire, és azok

közül is csak bizonyos típusúakra. Olyan ez, mintha a matematikában az euklideszi geometriát úgy neveznék, hogy „a Thalész-tétel, a kerületi szögek tétele és a többiek”. Bizonyos mértékben stimmelne az elnevezés, de rejtve maradna a tény, hogy ez a sokszínűség mind-mind öt *alapfeltevés*, az öt precízen megfogalmazott euklideszi axióma (1. Bármely két pontot össze lehet kötni egyenessel, 2. Egy egyenes mindkét irányban végtelenül meghosszabbítható. . . ) következménye.

Einstein fájlalta, hogy alkotására a relativitáselmélet elnevezés terjedt el. Ő maga az *invarianciaelmélet* elnevezést tartotta jónak, alapos okból: az elmélet két alappillére, amelyekre az összes további felfedezés és jóslat épül – például az előző bekezdésben említettek –, két *invarianciát* fogalmaz meg: (1) a *fizika törvényei* invariánsak, azaz akárhogyan mozog egymáshoz képest két megfigyelő, a fizika törvényeit *ugyanolyan matematikai alakban* tapasztalja teljesülni; (2) a *fény vákuumbeli sebességének számértéke* invariáns, azaz különböző megfigyelők a vákuumbeli fénysebességet minden irányban *ugyanakkorának mérik*, akárhogyan is mozognak egymáshoz és a fényforráshoz képest. Hogy hasonlatomat folytassam, olyan ez a két alapposztulatum Einstein fizikai elméletében, mint a matematikában az öt euklideszi axióma, amelyekre mint alapra az euklideszi geometria teljes katedrálisát felépíthetjük.

Einstein elmélete, tartalmát tekintve, a *téridő* elmélete. Legfontosabb mondanivalója, hogy a *téridő létező dolog*: a *téridő* a világ, amelyben élünk. Ha kísértést érzünk, hogy a jelenségek színpadának a háromdimenziós *teret* tekintsük, majd hozzátégyük, hogy az *idő* is fontos dolog, hiszen a jelenségek leírásához az időbeliség is hozzátartozik, akkor ezzel a mesterkélt szétválasztással hibát követünk el. Világunk *nem* a háromdimenziós tér, az időt pedig *nem* tekinthetjük különálló dolognak. A *téridő egyetlen négydimenziós terep*, az a négydimenziós színpad, ahol a jelenségek zajlanak.



Ismét az euklideszi geometriához mint hasonlathoz fordulok: ha a régi görögöknek erre a csodálatos szellemi alkotására „távolról” tekintünk rá, akkor voltaképpen nem az alul elhelyezkedő öt axiómát és nem is a rájuk épülő tételek és bizonyítások sokaságát látjuk, hanem a teljes egész, a *sík papírlap geometriája* tárul a szemünk elé. Hasonlóképpen, amikor Einstein elméletét nézzük „madártávlatból”, nem a részleteket – a két alapposztulátumot és a rájuk épülő érdekes jósolatokat – látjuk, hanem maga a *téridő-geometria* bontakozik ki a szemünk előtt. A téridőnek, ennek a négydimenziós színpadnak ugyanis éppúgy *geometriai* törvényszerűségei vannak, mint a sík papírlapnak, és ezek a geometriai törvények a két alpposztulátumból mind levezethetők. Ezzel érthetővé válik, miért adtam könyvemnek a *Téridő-geometria* címet. A téridőn is lehet érdekes felfedezéseket tenni, ahogy érdekes felfedezés a Thalész-tétel vagy a Pitagorasz-tétel a sík papírlapon.

A nevezetes ötödik euklideszi axióma, a párhuzamossági axióma elhagyásával a felületek geometriai leírása csodálatosan gazdagodik, új világ nyílik meg: a görbült felületek világa, ahol az egyenesek egyménél többször metszhetik egymást, és a párhuzamosok közeledhetnek egymáshoz. Fizikai világunkban is hasonló dolog történik nagy tömegű égitestek közelében: a téridő geometriája megváltozik, görbültté válik, és ebben a görbült téridőben (nagyon is valóságos, fizikai értelemben!) az egyenesek egyménél többször is metszhetik egymást, és a párhuzamosok közeledhetnek egymáshoz. Ezzel világosabbá válik az első bekezdésben említett közkeletű elnevezések tartalma: a *speciális relativitáselmélet* valójában a *sík téridő elmélete*, az *általános relativitáselmélet* pedig azért általános, mert a *görbült téridőket* is magába foglalja.

Ha az olvasó belelapoz a könyvbe, geometriai ábrák sokaságát látja. Ahogy a Thalész-tételt és társait is sokkal egyszerűbb körök és egyenes vonalak megrajzolásával megfo-

galmazni és bizonyítani, mint kizárólag szöveggel és algebrai képletekkel körülírni, úgy felfedezéseink nagy részét mi is téridőábrákról, úgynevezett *téridődiagramokról* fogjuk „leolvasni”, miközben a precizitás követelményéből semmit sem fogunk engedni.

Végül néhány szót a könyv alcímében szereplő korhatárjavaslatról: ez arra utal, hogy az ábrákon és a képleteken való eligazodáshoz *a középiskolás matematikaérettségi ismeretanyagára* van szükség. (Tudom, tudom, és elnézést kérek.)

# 1. A FÉNY LEGFURCSÁBB TULAJDONSÁGA

A fény a természet egyik legtitokzatosabb jelensége. A bonyodalom rögtön akkor kezdődik, amikor megpróbálunk szemléletes, könnyen elképzelhető fogalmat alkotni arról, hogy egyáltalán *mi* a fény. Mi történik, amikor meggyújtunk egy gyertyát vagy felkapcsolunk egy zseblámpát? A 17. századtól kezdve két elképzelés versengett egymással, az egyiket Christiaan Huygens és követői, a másikat Isaac Newton és hívei képviselték.

Az első elképzelést *hullámhipotézisnek* vagy *hullámmodellnek* hívjuk. Amikor gyertyát gyújtunk, a gyertya kanóca maga körül rezgésbe hoz egy titokzatos *közeget*, és ez a rezgési állapot *hullámként* terjed tovább a térben. A hullámrezgés elér a szemünkhöz – amely szintén „bele van merítve” ebbe a mindenütt jelen levő közegbe –, és a szemünk fényként érzékeli ezt az ingert. Hangtani hasonlattal úgy gondolhatunk a gyertyára vagy a zseblámpára, mint egy *hangszóróra*, amit ha bekapcsolunk, a hangszóró membránja előtti *levegő* rezgésbe jön, ez a rezgési állapot a fülünkhöz is eljut, rezgésbe hozza a dobhártyánkat, és ezt hangként érzékeljük. A fényhullám közege nem lehet a levegő – ezt rögtön megértjük, ha a távoli csillagok vagy akár a Nap fényére gondolunk, amely légüres téren át is eljut a szemünkhöz –, hanem valami más közegnek

kell lennie. Ez az egész univerzumot kitöltő közeg egyrészt nagyon sűrű kell hogy legyen (mert kísérleti tapasztalat mindenféle hullámról, hogy ritkás közegben lassan terjednek, a fény pedig gyors), másrészt nagyon ritkának is muszáj lennie, mert különben feltűnő mértékben fékezne a Hold és a bolygók mozgását. Az ellentmondásos tulajdonságokkal jellemezhető, rejtélyes fényszállító közeg a 17. században az éter nevet kapta.

A másik elképzelés szerint – amelyet *ballisztikus hipotézisnek* vagy *részecskemodellnek* nevezünk – a fényforrás olyan, mint egy *puska*. Amikor zseblámpát gyújtunk, a lámpából *kis részecskék, golyócskák sorozata* lökődik ki, és sebesen repül a tér különféle irányába. A szemünkbe csapódó golyócskákat fényként érzékeljük. Ebben az esetben nem kell az éternek, ennek a furcsa tulajdonságú közegnek a létét feltételezni, hiszen egy puskagolyó az üres téren is át tud haladni.

A 17. és 18. században nem lehetett igazságot tenni, melyik elképzelés írja le helyesen a fényt, mert az ókor óta addig az időszakig rendelkezésre álló fénytani kísérletek – lényegében kettő: a fényvisszaverődés és a fénytörés – *mindkét modellel* nagyszerűen értelmezhetők voltak. A 19. és 20. században már kifinomultabb kísérleteket lehetett végezni a fényvel, és kiderült az a rendkívül zavarba ejtő tény, hogy vannak kísérletek, amelyeket a hullámmodell magától értetődő egyszerűséggel meg tud magyarázni, viszont a golyócskák modellje nem tud vele mit kezdeni, de olyanok is vannak, amelyeket a golyócskamoddellel lehet rendkívül egyszerűen és elegánsan értelmezni, viszont a hullámmodell teljes kudarcot vall velük.

Azért olyan zavarba ejtő ez a tény, mert a kétféle modell *ellentmond* egymásnak, nem lehet mindkettő helyes. Ez világosan látszik, ha a fény *sebességére* gondolunk. Az egyik esetben, amikor a fényt a hang analógiájára képzeljük el, ahol a fényforrás a hangszóró szerepét játssza, a fény sebességét

*a fényhullámot szállító közeghez képest várjuk minden irányban állandó számértékűnek, de a fényforráshoz képest nem. Ha egy hangszórót ide-oda mozgatunk a szobában álló légtömeghez képest, akkor a hang továbbra is minden irányban ugyanakkora sebességgel terjed a szoba levegőjéhez képest. Amikor a hangszórót kivisszük a szabadba, ahol fúj a szél, a hangszóró mellett álló megfigyelő azt tapasztalja, hogy széllel szemben lassabban terjed a hang, a hátszél viszont rásegít a hangterjedésre; a légtömeggel együtt utazó megfigyelő pedig továbbra is minden irányban azonosnak méri a hanghullám sebességét. Ezt szokták a levegőbeli hangsebességnek nevezni, számértékét, ami tipikusan 330–340 m/s körüli, csakis a közeg jellemzői (a levegő sűrűsége, hőmérséklete) határozzák meg, de a hangszórónak a légtömeghez viszonyított mozgása nem szól bele. Egészen más a helyzet, ha a ballisztikus hipotézist tartjuk helyesnek. Ebben a modellben hullámszállító közegről szó sincs, és a fény sebességét a fényforráshoz viszonyítva várjuk állandó számértékűnek: akármerre fordítjuk a puskát (a fényforrást), a golyók (a fényrészecskék) ugyanakkora sebességgel indulnak ki róla. Ekkor természetesen egy olyan megfigyelő, aki a fényforráshoz képest mozog, várakozásaink szerint már különféle fénysebességértékeket tud mérni; ha a fényforrás felé halad, a fényrészecskéket a normálnál nagyobb sebességgel tapasztalja közeledni, ha hátrál a fényforrástól, akkor pedig kisebb sebességűnek méri a fényrészecskéket.*

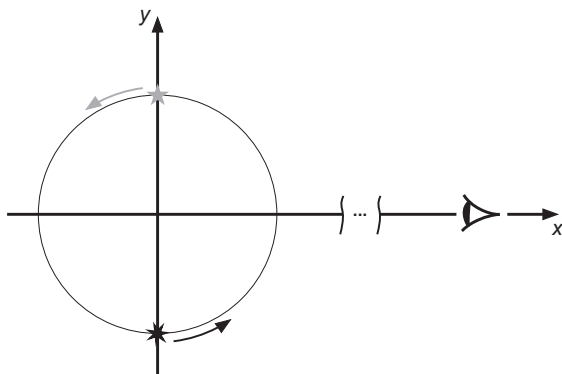
A fény sebességének számértéke a 19. század második felére elég pontosan ismert volt, a különböző mérések egyhangúlag  $3 \cdot 10^8$  m/s körüli eredményt mutattak. Ha a hullámodellt vesszük komolyan, akkor persze a mért számértéknek ingadoznia kellett, attól függően, hogy az adott kísérlet közben a Föld – a rajta utazó fényforrással együtt – éppen milyen sebességgel és milyen irányban mozgott az univer-

zumot egyenletesen kitöltő éterhez képest. Albert Michelson és Edward Morley 1887-ben kifinomult, pontos mérőelrendezéssel próbálta kideríteni az éterhez viszonyított mozgásunkat, vagy megfordított megfogalmazásban: azt, hogy kísérleti elrendezésükhöz képest merre és milyen erősséggel „fúj az éterszél”.

Képzeljük el, hogy léteznek olyan lények, akik, ha kiállnak a mezőre, nem tudják érzékelni közvetlenül a bőrükön a levegő mozgását. A szél sebességét próbálják kideríteni, de közvetlen érzetük nincs a szélről. Hangtani trükkhöz folyamodnak: valamilyen irányban leteszik a hangszórójukat, bekapcsolják, és mérik, mekkora sebességgel terjed a *hang* a hangszóróhoz képest abban az irányban. A mérést sok különböző irányban elvégezve világos eredményt kapnak a szélesebesség nagyságáról és irányáról (hiszen, mint láttuk, a szembe-szél fékezi a hangot, a hátszél pedig rásegít a hang mozgására). Teljesen hasonló volt Michelsonék ötlete az éterszél sebességének mérésére: mivel az étert mint közeget közvetlenül nem tudjuk érzékelni, megmérhetjük az éterszél sebességét úgy, hogy fényforrásunkat különböző irányokba állítva megmérjük, hogy az adott irányban a fényforráshoz képest mekkora a *fény sebessége* (amelynek az éterhez képest minden irányban ugyanakkora számértékűnek kell lennie). Az iránytól függően eltérő fénysebességértékekből azután ki lehet számolni, milyen gyors és milyen irányú volt az éterszél mozgása az adott kísérlet alatt (vagy kevésbé nagyképűen: a Föld és vele a kísérleti apparátus milyen gyorsan és milyen irányban mozgott a világegyetemet betöltő méltóságteljes közegehez képest). A több hónapon át tartó méréssorozat megdöbbentő eredménnyel zárult: *az éterszél és egyáltalán az éter jelenléte kimutathatatlanul bizonyult*, a kutatók minden alkalommal, minden irányban egyformának mérték a fény sebességét, holott a fényforrás és maga a mérési elrendezés is – a Föld

Nap körüli keringése és napi forgása következtében – rengetegszer irányt változtatott; az pedig elképzelhetetlen, hogy az éter – ez az egész univerzumot betöltő közeg – valamiért szintén egyfolytában irányt változtatott volna, mégpedig mindig konkrétan Michelsonéhoz igazodva.

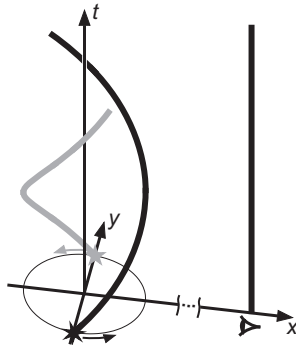
A fényt mint egy közeg hullámzását elképzelő modell tehát kudarcot vallott, összeegyeztethetetlennek bizonyult a Michelson–Morley-kísérletek eredményeivel. Michelsonék eredményei ugyanakkor rögtön érthetővé tehetőek, ha a hullámmmodell helyett a ballisztikus hipotézist fogadjuk el helyesnek. Ekkor ugyanis az „éter” feltételezésére semmi szükség, és nem is várhatunk más eredményt, mint amit Michelsonék kaptak, hiszen e szerint a hipotézis szerint a fénysebességnek a *fényforráshoz képest* kell mindig ugyanakkora számértékűnek lennie, márpedig ők a fényforrást sosem mozgatták a sebességmérő apparátushoz képest.



1. ábra. Kettőscsillag megfigyelése

A probléma az, hogy a ballisztikus hipotézis *szintén kudarcot vall*, ha össze akarjuk egyeztetni a fénysebességmérésekkel. Erre például a *kettőscsillagok* megfigyeléséből nyerünk egyértelmű bizonyítékot. Kettőscsillagnak nevezzük, amikor

két csillag egymás körül (pontosabban a közös tömegközéppontjuk körül) kering, ahogyan az 1. ábra mutatja. Az ábrán a két csillag az  $x$ - $y$  síkban kering, és az  $x$  tengelyen, messze a csillagoktól helyezkedünk el mi, a távcsővel felszerelkezett megfigyelők (a szemszimbólum jelképez minket). A csillagok mozgási síkjára élével nézünk rá, tehát a két csillagot lényegében az  $y$  tengely mentén látjuk oda-vissza mozogni. Az egyszerűség kedvéért feltételeztem, hogy a csillagok azonos tömegűek, ilyenkor a keringés közben mindig ugyanannak a körpályának ellentétes pontjain helyezkednek el. Úgy tűnik,



2. ábra. A két csillag és az azokat néző csillagász világvonala 3D téridődiagramon

a 2. ábra azt mutatja, mintha az olvasó kicsit felülről, „mardártávlatból” nézne rá az  $x$ - $y$  síkra, de vigyáznunk kell: a függőleges tengely nem a harmadik térbeli irányt, hanem az *időt* mutatja. A 2. ábra tehát egy úgynevezett háromdimenziós  $(x$ - $y$ - $t$ ) *téridődiagram*, amelyen a két csillag mozgását a két,  $t$  tengelyre felcsavarodó spirálvonal ábrázolja (hiszen a csillagok körbe-körbe mozgása közben „felfelé telik az idő”), a minket reprezentáló vonal pedig (akik az  $x$  tengely adott pontján egy helyben állunk) a  $t$  tengellyel párhuzamos, függőleges egyenes. A jobb áttekinthetőség kedvéért nézzünk rá a 2. ábrára oldalról, az  $y$  tengely felől, úgy, hogy az  $y$  ten-



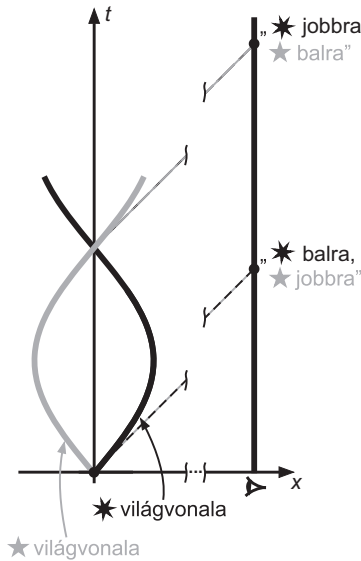
gelyt egyetlen pontnak lássuk. Így kapjuk a 3. ábrán látható kétdimenziós  $(x-t)$  téridődiagramot, amelyen az oldalról mutatott spirálvonalak vetülete hullámalakokat rajzol ki. Ha a



3. ábra. A két csillag és az azokat néző csillagász világvonala az  $(x, t)$  síkon: ezt várjuk, ha a ballisztikus hipotézis helyes. . .

ballisztikus hipotézis helyes, a csillagokat mint fényforrásokat úgy képzelhetjük el, mintha a felszínükből a sündisznö tuskéihez hasonló módon „puskák” állnának ki, amelyek kis golyócskákat, fényrészecskéket lönek ki. Azért látjuk folyamatosan a csillagokat, mert a belőlük kiálló pusok között mindig van olyan, amely épp felénk van irányítva. Képzeljük el, hogy a  $t = 0$  időpillanatban, amikor az 1. ábrán szürkével jelölt csillag éppen távolodik tőlünk, a feketével jelölt csillag pedig éppen felénk mozog, mindkét csillag egy-egy fényvillanást bocsát ki felénk. Mikor látjuk ezeket a felvillanásokat? A szürke csillag fénypuskája távolodás közben, hátrafelé lövi ki a felénk repülő fényrészecskét, míg a fekete csillag a saját mozgásirányában, előrefelé süti el azt a fénypuskát,

amelynek lövedéke elér majd minket. A szürke csillag fényvillanása ezért lassabban mozog hozzánk képest, a feketéé pedig gyorsabban – ezt jelzi az origóból kiinduló szürke, illetve fekete szaggatott vonalak eltérő meredeksége a 3. ábrán. Fél periódus múlva felcserélődnek a szerepek, most a szürke csillag mozog felénk, tehát a belőle kilőtt fénygolyócskák sebességéhez hozzáadódik a csillag sebessége, a feketével jelelt csillag pedig távolodik tőlünk, tehát azoknak a fénygolyócskáknak a sebességéből kivonódik a csillag távolodási sebessége. A végeredményt leolvashatjuk a 3. ábráról: *ha a ballisztikus hipotézis helyes*, a megfigyelőhöz elég összevissza sorrendben érkeznek meg a két csillag helyzetéről tudósító információk, a 3. ábra elrendezésében például a szürke csillagot előbb látjuk megjelenni az  $y$  tengely bal oldalán, és csak aztán a jobb oldalán (ahol pedig korábban tartózkodott!). *A kísérleti tapasztalat ennek teljesen ellentmond*, soha nem tapasztalunk ilyen jelenségeket a kettőscsillagok megfigyelésekor. Függetlenül attól, hogy milyen messze van tőlünk egy ilyen kettőscsillagrendszer, mindig „szinkronban” látjuk a két csillagot megjelenni a két ellentétes oldalon. Muszáj levonnunk a következtetést, hogy a 3. ábra *helytelen*. Ott követtük el a hibát, hogy feltételeztük: a fény úgy viselkedik, mint a puska golyó, amelynek hozzánk viszonyított sebességét úgy kell kiszámítani, hogy abba belekalkuláljuk a puska hozzánk viszonyított közeledő-távolodó mozgását is. A tényleges megfigyelésekkel meglepő módon a 4. ábra tér-idődiagramja van összhangban: a két csillagból kiinduló fényimpulzusok mind *ugyanakkora sebességgel* mozognak hozzánk képest – ezt mutatja a 4. ábrán a szaggatott vonalak azonos meredeksége –, függetlenül attól, hogy az őket kibocsátó fényforrások éppen távolodtak-e tőlünk vagy közeledtek-e felénk. Tehát a fény ballisztikus modellje is kudarcot vall, összeegyeztethetetlen azzal, amit a kettőscsillagok megfigyelésekor tapasztalunk.

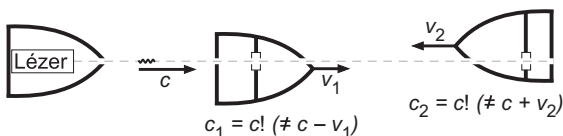


4. ábra. ...de ez a valóság

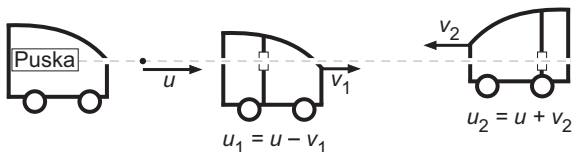
Ezen a ponton már teljesen tanácstalanok vagyunk: ha sem a hullámmodellt, sem a részecskemodellt nem fogadhatjuk el helyesnek, mert mindkettő ellentmondásban van a fénysebességmérésekkel, akkor egyáltalán miféle jelenségként tudjuk a fényt *elképzelni*? Ez a tanácstalanság nem egészen azt jelenti, hogy a 21. században még mindig fogalmunk sincs róla, mi a fény. A fizikusok nagyon pontos *matematikai leírást* tudnak adni róla, amely tökéletes összhangban van a különféle kísérleti megfigyelésekkel. A szemléletes, könnyen elképzelhető modelljeinket azonban fel kell adni: a fény *nem* egy közeg hullámmozgása, és *nem* is olyan, mint a puskából kilőtt kis golyók sorozata. Nem kapcsolhatunk hozzá egyetlen mentális képet, amelyhez biztonsággal le tudnánk horgonyozni a képzeletünket. Ha mindenáron el akarjuk képzelni valahogy, és ehhez a mindennapi életünkben ismerős fogalmakat aka-

runk használni, akkor talán a legjobb a hullámmodellt és a részecskemodellt egyszerre észben tartani, és fejben váltogatni őket, közben nem elfelejtve, hogy mindkettő hamis.

A fenti és hozzájuk hasonló kísérletek egy még ennél is megrázóbb következtetésre készítetnek minket: el kell fogadnunk azt a nagyon nehezen megemészthető, de kísérletileg alátámasztott tényt – ez a fény legfurcsább tulajdonsága –, hogy *egy fényforrás által kibocsátott fényimpulzus sebességét (vákuumban) minden megfigyelő minden irányban ugyanakkora számértékűnek méri, függetlenül a megfigyelők egymáshoz és a fényforráshoz viszonyított sebességétől.*



5. ábra. Milyen sebességűnek mérik a fényimpulzust a lézerhez képest különböző gyorsasággal mozgó utazók? A döbbenetes válasz: mindenki ugyanakkorának méri!



6. ábra. A tapasztalat szerint – a szokásos mérési pontosságon belül – ilyen sebességűnek mérik a puskagolyót a puskagolyóhoz képest különböző gyorsasággal mozgó utazók

Nem az „emésztés könnyítésére” szolgál az 5. és 6. ábra, hanem éppen ellenkezőleg: annak tudatosítására, mennyire döbbenetes az előző mondatban megfogalmazott tény. Az 5. ábra bal oldalán egy űrhajó látható, rajta egy lézerrel. A lézer által kibocsátott fényimpulzus sebességét az űrhajó üllök  $c = 3 \cdot 10^8$  m/s-nak mérik. A fényimpulzus átha-

lad a középső űrhajón, amely  $v_1$  sebességgel távolodik a lézert szállító járműtől. A középső űrhajó utasai megméri-  
 k a fényjel  $c_1$  sebességét, de nem  $c - v_1$ -nek találják, ahogy józan  
 ésszel várnánk, hanem ők is  $3 \cdot 10^8$  m/s-nak! A jobb oldali  
 űrhajó  $v_2$  sebességgel közeledik a lézerhez, de a fényimpul-  
 zust ebben az űrhajóban is  $3 \cdot 10^8$  m/s sebességgel látják átha-  
 ladni, nem pedig  $c + v_2$  sebességgel, ahogy józan ésszel vár-  
 nánk! Ezek valóban hajmeresztő kijelentések, de a Michelson-  
 Morley-kísérletek, a kettőscsillag-megfigyelések és más, földi  
 laboratóriumi kísérletek alapján kénytelenek vagyunk elfo-  
 gadni őket. Közvetettebb bizonyítékaink is vannak arra, hogy  
 az 5. ábra felirata helyesek: mint a Bevezetőben láttuk, a  
 fénysebesség invarianciája mint alapfeltevés az einsteini el-  
 mélet egyik alapköve. Rengeteg további furcsa jóslat követ-  
 kezik belőle (amelyeket részletesen tárgyal ez a könyv), és ha  
 ezek közül a megfigyelések bármelyiket megcáfolnák, akkor  
 az alapfeltevést is el kellene vetnünk. A megfigyelések azon-  
 ban mindmáig egymás után igazolni látszanak ezeket a furcsa  
 jóslatokat, ezzel közvetve is megerősítve, hogy a fénysebesség  
 invarianciája a természet valóságos tulajdonsága.

Letaglózó ez a gondolat, mert *tudjuk*, mindennapi életünk-  
 ben *tapasztaljuk*, hogy a sebességek igenis összeadhatók. Né-  
 zük a 6. ábrát, amely az 5. ábrához hasonló szituációt mu-  
 tat be. Az egyetlen különbség, hogy az a dolog, amelynek  
 a sebességét a három járműhöz képest megmérjük, itt nem  
 fényimpulzus, hanem puskagolyó. Ebben az esetben tényleg  
 igaz (mérésekkel igazolható!), hogy a puskától távolodó kö-  
 zépső autó a puskacsövet  $u$  sebességgel elhagyó lövedéket  
 $u_1 = u - v_1$  sebességűnek méri, a jobb szélső autó pedig gyor-  
 sabbnak,  $u_2 = u + v_2$  sebességűnek.

Hamarosan látni fogjuk, hogyan lehet az 5 és 6. ábrát  
 összebékíteni. A téridő geometriája fogja megadni a választ:  
 a sebességek *nem* adhatók össze és vonhatók ki egymásból,

a 6. ábra feliratai szigorúan véve nem helyesek. Ugyanakkor a matematikai összefüggés, amelyet levezetünk – összhangban a kísérleti megfigyelésekkel is –, egyszerre ad igazat az 5. és a 6. ábrának. Ki fog derülni, hogy az egyszerű összeadáskivonás nagyon jó pontossággal működik olyan kis sebességek esetén, mint az autóké, a nyulaké vagy a puskagolyóké, aztán minél nagyobb sebességekre próbáljuk alkalmazni, annál kevésbé pontos, végül a fényéhez közeli sebességekre már látványosan kudarcot vall. Itt megjegyzem, hogy a fény vákuumbeli sebessége nem *hajszálpontosan*  $3 \cdot 10^8$  m/s (tehát nem 300 000 000 m/s), hanem kb. 299 792 458 m/s, de az egyszerűség kedvéért – és mert a mondandóm szempontjából a sok tizedesjegyre megadott pontosságnak nincs semmi jelentősége – az egész könyvben maradok a  $3 \cdot 10^8$  m/s-nál, amit néha (nem túl precízen) 300 000 km/s formába fogok írni.

Mielőtt elindulnánk kalandozásunkra a téridőben, még egy megjegyzés: Ebben a fejezetben a nevezetes Michelson–Morley-kísérlet ismertetését igencsak elnagyoltam. A részletekről – a kísérleti elrendezésről és a részletes számításokról – az érdeklődő olvasó sok helyen tájékozódhat: interneten, illetve különféle fizikakönyvek relativitáselméletet tárgyaló fejezetében. A ballisztikus hipotézis cáfolatával viszont érdemes volt kicsit közelebről megismerkednünk, mert bevezetett bennünket a *téridődiagramok* használatába. Az ilyen diagramok lesznek ezután is legfőbb segítőtársaink a téridő izgalmas tulajdonságainak felderítésében.