

## Speciális relativitáselmélet és...

(Szerkesztett változat.)

[1.dia] Nehezen álltam kötélnek, hogy a relativitáselméletről előadást tartsak ezen az ösz-szejövetelen. Az ok nyilvánvaló: A rendelkezésre álló negyven perc túl kevés ahhoz, hogy az elmélet lényegét érthetően össze lehessen foglalni. Nem matematikai nehézségekről van szó, különösen nem itt a Műegyetemen. A speciális relativitáselmélet igazi terhét ugyanis nem valamilyen nehéz matematika, hanem a *fogalomrendszer* hordozza, amely szokatlan és sok tekintetben ellentmond a szemléletnek. A fogalomrendszer megemésztése az, ami időigényes folyamat.

Néhány fontos kérdést azonban — azt hiszem — meg tudunk most beszélni, hiszen az itt jelenlévők nagyrésznél már bizonyosan van priusza relativitáselméletből (én magam életfogytos vagyok az ügyben).

A relativitáselmélet nem-szemléletességével összefüggő pszichológiai gátat talán mérsékelni lehet, ha realizáljuk, hogy valójában már a newtoni fizika se nagyon szemléletes. Newton gravitáció elmélete például azt állítja, hogy a Nap  $\approx 10^{34} N$  erővel vonzza a Földet 150 millió kilométer távolságból a vákuumon — a "*semmi*" — keresztül, és ez nyilván egyáltalán nem szemléletes állítás. Newton maga annyira képtelennek tartotta, hogy nem győzött szabadkozni miatta. De nem tehetett semmit, mert az elmélete **működött!**

Az általános relativitáselmélet, amely a newtoni tömegvonzás helyébe lépett, megszünteti ezt az el- és befogadhatatlan távolhatást, de ez nem ennek az előadásnak a témája. Azonban egy másik nézőpontból a newtoni tömegvonzás a legszorosabban a témánkhoz tartozik.

Nézzünk például két égitestet, amelyek az űrben véletlenül egymás közelében haladnak el és a pályájuk a tömegvonzás következtében elhajlik [2.dia]. Newton elmélete szerint az elhajlás mértékét a  $GM_1M_2/r^2$  gravitációs erő segítségével lehet kiszámítani. De mekkora az  $r$  nagysága abban a pillanatban, amikor az egyik égitest éppen *itt* van [3.dia]? Talán *ennyi*? Vagy *ennyi*? Vagy éppenséggel *ennyi*? Ez attól függ, hogy hol van a másik égitest *ugyanabban a pillanatban*. De biztosak lehetünk-e benne, hogy egymástól csillagászati távolságra lévő pontokban van egyáltalán értelme *ugyanarról a pillanatról* beszélni?

Ez az a probléma, amit legelsőként szeretnék megtárgyalni.

## I. A newtoni és az einsteini idő.

Gondoljuk csak meg jobban, miről is van szó [4.dia]. Ha én *itt* kiejtem a számon azt a szót, hogy "most", biztos-e, hogy ezzel a tettemmel képes vagyok kijelölni a Világegyetem

tetszőlegesen távoli zugában egyetlen meghatározott pillanatot? Természetesen lehet, hogy így van, lehet, hogy a Világegyetem úgy "lélegzik", mint valamiféle élőlény, és a mindenkori egyetemes "most" nem más, mint ennek a kozmikus lélegzésnek a fázisa. Ha ez a metafora helyesen tükrözi az idő valóságos tulajdonságait, akkor az általános tömegvonzás képletének nevezőjében az  $r$  jól definiált mennyiség, amellyel lehet számolni. A newtoni fizikában ezt fel is tételezzük. Ezt értjük azon, hogy a newtoni fizikában az idő vagy — másképp kifejezve — az egyidejűség *abszolút*.

Mint mondtam, lehet, hogy tényleg így van, de az is lehet, hogy nincs így. Az is elképzelhető, hogy a Világegyetemet nem járja át az a szüntelen lüktetés, amely az idő múlását mindenütt koordinálja, és amikor kimondom azt, hogy "most", legfeljebb lokális zavart keltek az idő óceánjában, amely a távolsággal gyorsan elenyészik és már egyik pillanat sem feleltethető meg egyértelműen az általam kiejtett "most"-nak.

Mindez nyilván a legszorosabb összefüggésben van a vákuumon át ható newtoni gravitációs erő víziójával: Ha az egyik égitesten kiejtett "most"-nak nincs egyértelmű párja a másik égitesten, akkor az égitestek közötti  $r$  távolság sem egyértelmű, és az általános tömegvonzás képlete jelentés nélküli betűkombinációvá alacsonyodik.

Védhető-e az elmondottak ismeretében az a vélekedés, hogy a newtoni fizika időfogalma *szemléletes*, a relativitáselméleté pedig, amelynek sarkköve — mint az itt ülők közül bizonyára sokan tudják, — a newtoni abszolút egyidejűség elvetése, *nem szemléletes*? Szerintem egyáltalán nem védhető. Én például teljesen elképzelhetetlennek tartom a Világegyetem távoli pontjai közötti szinkronitást feltételező időfelfogást. De ez persze a legkevésbé sem tetszés vagy nemtetszés, hanem — mint már hangsúlyoztam — a **működés** kérdése. *Ma rendelkezésünkre áll két nagyszabású fizikai elmélet, amelyek közül az egyik — a newtoni — az abszolút egyidejűség létén, a másik — az einsteini — az abszolút egyidejűség nemlétén alapul. Abból, hogy melyik működik pontosabban, következtetni lehet arra, hogy melyik időfelfogás áll közelebb a valósághoz.*

Mivel a két időfelfogás gyökeresen különbözik egymástól az ember azt gondolná, hogy ha az egyik elmélet korrekt, akkor a másik biztosan látványosan téves. A helyzet azonban az, hogy nem ez a helyzet: A fénysebességnél sokkal kisebb sebességtartományban a két homlokegyenest ellentétes időfelfogáson alapuló elmélet praktikusán azonos eredményekre jut. A newtoni fizika ragyogó eredményeinek ismeretében megállapíthatjuk, hogy ha nem így volna, akkor "einsteini fizika" ma már csak a tudománytörténet számára létezne.

Az abszolút egyidejűség hiánya az *ikerparadoxonban* a legszembeötlőbb [5.dia]. Képzeljünk el egy ikerpárt — legyen a nevük mondjuk Ubul és Vendel. Vendel űrhajós utazásra indul (piros vonal), Ubul otthon marad (kék vonal). A grafikonon azt ábrázoltuk, hogyan múlik számukra az idő. A számok és a gombócok ezt mutatják, a határozottság kedvéért órákban. Indulás előtt az órákat szinkronizálták, az űrhajó visszaérkezése után Vendel mégis egy órával fiatalabb, mint Ubul: Mindkét testvérnek *saját sajátideje* van, amelyek ritmusa különbözik

egymástól.

Képzeld el, hogy Vendelnek három óránként valamilyen gyógyszert kell bevennie. Amikor 1 órákor bevette, a két testvér még együtt volt. Négy órákor Ubul aggódva sóhajt fel: Beveszi-e vajon az úrhajón a tesóm *most* a gyógyszerét? Vendel megbízható fickó, négykor be is veszi a gyógyszert, de vajon az otthon maradt testvér nézőpontjából ez tényleg *most* volt-e a "most" időhatározónak abban az értelmében, ahogy a mindennapi életben használjuk? Egyáltalán nem. Ez fehéren-feketén kiderül, ha a gyógyszer bevétele nem négykor, hanem — mondjuk — fél hatkor esedékes. Ha Ubul fél hatkor kérdi magától, hogy vajon beveszi-e *most* Vendel a gyógyszerét, ezt biztosan rosszkor kérdi, mert amikor Vendel számára eljön a gyógyszer bevétele ideje, a két testvér már újra együtt lesz.

Mint látjuk, Ubul aggodalma alaptalan volt, hiszen Vendel a kellő időben lenyelte a megfelelő pirulát. Annak nincs jelentősége, hogy Ubul nézőpontjából ez az aktus a szó mindennapos értelmében "most" volt-e: Teljesen elegendő lett volna, ha Ubul úgy teszi fel a kérdést, hogy vajon beveszi-e Vendel a megfelelő időpontban (négykor, fél hatkor) a gyógyszerét. A példa elég jól illusztrálja, hogy a "most" időhatározó eltűnése a fizikából, ami az abszolút egyidejűség eltűnésének egyenes következménye, nem feltétlenül jelent igazi veszteséget.

Az ikerparadoxon létezése ma már bizonyított tény: Egy NASA kísérletben 70:1000000 relatív pontossággal igazolták a relativitáselmélet megfelelő képletét. A GPS (Global Positioning System) pedig nem működne a kellő pontossággal, ha a navigációs műholdakon nem vennék rutinszerűen figyelembe a sajátidők eltérő ritmusát.

## II. A Lorentz-transzformáció paradoxonja.

Minden kísérlet valamilyen *vonatkoztatási rendszerben* történik, a kísérletekkel kapcsolatos számítások elvégzéséhez pedig *koordinátarendszert* kell felvenni. A vonatkoztatási rendszer valamilyen *objektum* (ez a szoba, úrhajó, vonat, stb.), amely nyugszik a hozzá tartozó koordinátarendszerben. Alapvetően fontos kérdés, hogy a különféle mozgásokat végző vonatkoztatási rendszerek milyen viszonyban állnak egymással és közülük melyek az inerciarendszerek. Ennek a kérdésnek a vizsgálatához olyan formulákra van szükség, amelyek lehetővé teszik az inerciarendszerekhez rögzített koordinátarendszerek közötti átszámítást. A relativitáselméletben a Lorentz-transzformáció tölti be ezt a szerepet [6.dia]. Ezek a képletek egy paradoxont foglalnak magukba: Alapvető fontosságúak annak ellenére, hogy a koordinátarendszerek, amelyek között kapcsolatot létesítenek, *csak a fejünkben léteznek*.

Példaként tekintsük a Naprendszer tárgyalását Newton gravitáció elméletében. Ahhoz, hogy a bolygópályákat ki tudjuk számítani, muszáj koordinátákat felvenni: Az origó legyen a Naprendszer tömegközéppontjában, minden bolygónak — és természetesen a Napnak is

— legyen  $r$ -je,  $\vartheta$ -ja és  $\varphi$ -je. Teljesen nyilvánvaló, hogy a gömbi koordinátarendszer valójában "nincs ott" és a koordinátákat csak elképzeljük. Ez a helyzet tipikus: Azt mondjuk ugyan, hogy "felvesszük a koordinátarendszert", de valójában ezt csak gondolatban tesszük meg, mert arra, hogy valóságosan is "felvegyük", általában nincs se szükség, se lehetőség. Koordinátarendszer nélkül viszont nem tudunk kiszámítani semmit!

De ha a koordinátarendszer "nincs ott", akkor hogyan lehet ellenőrizni, hogy a koordinátákon alapuló számításunk jó eredményt adott-e? Úgy, hogy *természeti objektumok közötti ko incidenciákat* figyelünk meg, nem pedig egyedi bolygók  $r$ -jét,  $\vartheta$ -ját,  $\varphi$ -jét. Például azt, hogy a Vénusz ekkor meg ekkor átvonul a Nap előtt a Nap középpontjától ilyen meg ilyen szögtávolságra. Egy ilyen jelenséget lehetetlen koordinátarendszer nélkül *előre jelezni* annak ellenére, hogy a *megfigyeléséhez* egyáltalán nincs szükség koordinátákra. Az olyan mennyiségeket, amelyek a koordinátarendszer valóságos realizálása nélkül is megfigyelhetők, *invariánsoknak* nevezzük.

A relativitáselmélet — mint tudjuk, — négydimenziós koordinátarendszerrel dolgozik, amelynek az egyik tengelye az idő. Ezért van szükség arra, hogy a vonatkoztatási rendszereket *gondolatban (!)* órákkal szórjuk tele és az órákat *gondolatban (!)* fényjelekkel szinkronizáljuk. A relativitáselmélet csak annyit állít, hogy *ez lehetséges* és az a téridőbeli koordinátarendszer, amit így kapunk, rendkívül célszerű (a Lorentz-transzformáció ilyen koordinátarendszerben érvényes). De ha úgy tetszik, dolgozhatunk más téridő koordinátarendszerekkel is, amelyekben az órákat egészen más módon szinkronizáljuk. Ha jól számolunk, a megfigyelhető jelenségek — az invariánsok — ettől nem változnak meg, hiszen a megfigyelés nem igényli se az egyik, se a másik koordinátarendszert.

Mégegyszer aláhúzom: *A laboratóriumi mérésekhez vagy más megfigyelésekhez nincs szükség koordinátarendszerre.* Minden inerciarendszerben elvégezhetjük például a fénysebesség mérését tetszőleges irányban. Ehhez elvben nem kell más, mint rövid fényfelvillanásokat produkáló fényforrás, fotodetektor, mérőszalag és két pontos óra. A fényforrást és a detektort összekötő egyenes felezőpontjában az órákat azonos állásba hozzuk (szinkronizáljuk) és szimmetrikus mozgattással az egyiket a forrás, a másikat a detektor mellé mozgattjuk el. A mérési eljárás ezek után teljesen egyértelmű, csak technikai jellegű problémák jelentkezhetnek. A mérés természetesen nem igényel semmiféle reálisan is létező koordinátarendszert, a laboratóriumban szétszórt órákat sem.

Azért tértem ki ilyen részletesen erre az egyszerű eljárásra, mert gyakran lehet találkozni olyan tévhittel, hogy a fénysebességet csak oda-vissza úton lehet megmérni, egyirányban nem, és ennek következtében sohasem tudjuk meg, hogy az odaúton ugyanakkora-e, mint a visszaúton. A félreértés egyik oka az, hogy oda-vissza úton *pontosabban* lehet a fénysebességet meghatározni, mert csak egyetlen órára van szükség, és ezért a gyakorlatban ezt az eljárást követik. A másik ok az, hogy a téridőbeli koordinátarendszer megkonstruálásában szereplő órákat valóságosnak hiszik — de azt most nem tudom elmondani, hogyan jutnak el ebből a hibás következtetéshez.

### III. Az objektumok sebessége.

A relativitáselmélet további fontos következménye, hogy két inerciarendszer relatív sebessége mindig kisebb  $c$ -nél. Ez a Lorentz-transzformációk matematikai alakjából nyilvánvaló. A  $V$  két inerciarendszer relatív sebessége, és ha ez nem lenne kisebb  $c$ -nél, a képlet a nevezőkben megjelenő "veszélyes négyzetgyök" miatt értelmetlenné válna.

Ebből azonban nem következik, hogy a relativitáselmélet szerint fénynél nagyobb sebesség egyáltalán nem létezhet. Ilyen sebességet ugyanis nagyon könnyű produkálni pl. úgy, hogy egy távoli falat zseblámpával megvilágítunk és közben a zseblámpát elforgatjuk; a fényfolt a falon mozoghat bármilyen sebességgel, a fénysebesség sokszorosával is. Az ember azonban elég könnyen meggyőzi magát, hogy a fényfolt mozgása csupán geometriai trükk, mert a fizikai hatás nem a fényfolt elmozdulásának az irányában, hanem arra merőlegesen terjed fénysebességgel. A sajtóban sokszor jelennek meg hírek arról, hogy különleges körülmények között "cénélgyorsabb" sebességű fénynyalábot figyeltek meg. Ezek a híradások nem szükségképpen hamisak, de eddig mindig ilyen geometriai természetű "cénélgyorsabb" sebességre vonatkoztak, amit egyébként maguk a kísérletezők többnyire hangsúlyoztak is, csak az újságcímből felejtették ki.

De mozoghatnak-e a relativitáselmélet szerint igazi részecskék gyorsabban, mint a fénysebesség? A Lorentz-transzformáció képletéből erről semmit sem lehet mondani, mert — mint már szó volt róla — ezekben a képletekben nem részecske-sebességek, hanem az inerciarendszerek relatív sebessége szerepel. Egy tipikus formula, amelyben már a részecskék sebessége is megjelenik, a sebességösszeadás képlete [7.dia]. Ebben  $V$  továbbra is két inerciarendszer relatív sebessége, de  $v_x$ ,  $v_y$ ,  $v_z$  már egy tömegpont sebességének a három komponense. *Ezek azonban nincsenek a veszedelmes négyzetgyökjel alatt*, ezért egyáltalán nem nyilvánvaló, miért ne mozoghatnának a fénynél gyorsabban pl. elemi részecskék, amelyekhez biztosan nem rögzíthető vonatkoztatási rendszer.

Úgy látszik, hogy a relativitáselmélet ezt a lehetőséget eleve nem zárja ki, noha mind a mai napig senki sem látott fénynél gyorsabban mozgó elemi részecskét (ami azonban nem akadályozta meg az elméleti fizikusokat abban, hogy elnevezzék őket *tachionoknak*). Van azonban egy szempont, ami valószínűtlenné teszi a létezésüket: az, hogy vezethetnek *kauzalitási paradoxonokra*. Ha ugyanis a fénynél gyorsabban mozgó részecskéket fel lehet használni információ továbbítására (és miért ne lehetne?), akkor a relativitáselmélet szerint üzeni lehet velük a múltba vagy a jövőbe és ezzel *tisztán logikai természetű* ellentmondásokat lehet előidézni, olyat például, hogy valami meg is történt meg nem is történt meg. A logika azonban a természettörvényektől eltérően nem a természet *működésének mikéntjével*, hanem a *létezésével* függ össze. A logikai ellentmondások lehetőségét magukban hordó tachionok valószínűleg ezért nem realizálódnak a természetben.