A relativitáselmélet tökéletesen azonos a relativitáselmélet előtti fizikával[1]

E. Szabó László

MTA-ELTE Elméleti Fizikai Kutatócsoport
ELTE TTK Tudománytörténet és Tudományfilozófia Tanszék

[1] Ortvay Kollokvium, 2002. március 21.

Első beszélgetés

Fizikus. Tehát egy négydimenziós világban élünk, és ennek a négydimenziós világnak, a téridőnek a geometriáját a Minkowski-geometria írja le. Két esemény távolsága és a köztük eltelt idő függ attól, hogy melyik inerciarendszerben értjük. Az idő az egymáshoz képest mozgó inerciarendszerekben másképpen múlik. ... A Minkowski-térben a metrika ... tehát ez egy nem-euklideszi geometria ... a fizika törvényeit megfogalmazó Lagrange-függvényeknek tehát nem a Galilei-transzformációval szemben kell invariánsanak lenniük, hanem a ...

Diák$_1$. Engem mindig is nagyon foglalkoztatott, hogy mi is az a tér, de még inkább, hogy mi az idő. Olvastam is ezekről pár dolgot. Ezek nagyon nehéz, misztikus fogalmaknak tűnnek számomra. De amit most a tanár úr mond, az nagyon megdöbbentő. Sokmindent képzel az ember az idővel és a térrel kapcsolatban ... de ezek, ... nagyon ellene vannak az ember intuíciójának.

Fizikus. Így van! De éppen ez a szép a fizikában! A fizikus nem fantáziál a világról, nem merül el mindenféle metafizikai révedésben, hanem megkérdezi a TERMÉSZETET, azaz kísérletezik. És mindig a kísérleti tényekből indul ki. Márpedig a kísérleti tények azt mutatják, hogy a világ nem olyan, mint amilyennek hittük, hanem olyan, amilyennek a relativitáselmélet írja le. Nem tudom mi az a „tér” és „idő” metafizikai értelemben, amiről maga beszél, lehet, hogy van annak is valami értelme. A fizikai tér és idő azonban ilyen.

Diák$_2$. De ha a tapasztalat alapján mondjuk, hogy a világ geometriája a négydimenziós Minkowski-geometria, akkor hogyan lehetséges, hogy az emberiség sok ezer éven át erre nem jött rá? És miért pont a klasszikus téridőt érezzük olyan természetesnek?

Fizikus. Ennek nagyon egyszerű oka van. Mert az emberiség egész története, sőt az evolúció egész története a fizikai valóság olyan tartományában zajlott le, amit mai terminológiával „nem-relativisztikus” tartománynak nevezünk ($v \ll c$). A kísérleti fizikának a fejlődésével csak a századforduló idején jutottunk el oda, hogy belelátunk a relativisztikus tartományba is. Volt tehát ideje az evolúciónak hozzászoktatni az agyunkat a nem-relitivisztikus téridő fogalmaihoz.

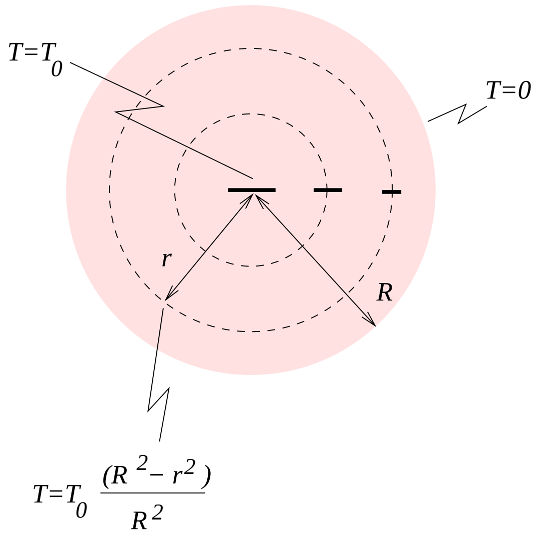
Második beszélgetés

Filozófus. A tudományos elméletek általában empírikusan aluldetermináltak. Ez azt jelenti, hogy az elméleteinket nem határozzák meg egyértelműen a tapasztalat tényei. Sokszor az a helyzet, és ez elvben sohasem zárható ki, hogy ugyanazokat a kísérleti (tapasztalati) tényeket több különböző elmélet is képes reprodukálni.

Nézzünk egy példát: Mint Poincaré rámutatott, nem lehetséges megmondanunk, hogy milyen a világ (a téridő) geometriája, függetlenül attól, hogy milyen fizikai elmélettel párosítjuk.

$$\begin{array}{ccccc} (\text{téridő geometria})' & + & (\text{fizika})' & = & (\text{világ empirikus tényei}) \\ (\text{téridő geometria})'' & + & (\text{fizika})'' & = & (\text{világ empirikus tényei}) \\ & & & & \\ & & \vdots & & \end{array}$$

Mi döntjük el – mondja Poincaré –, hogy hol vágjuk el a fizikát és a geometriát, s ezt a következő példán világítja meg:



Poincaré megmutatta, hogy ha e körlap lakói úgy veszik, hogy méterrúdjaik hossza mindenütt egyforma, akkor arra a konklúzióra jutnak, hogy *egy végtelen kiterjedésű, konstans negatív görbületű Bolyai–Lobacsevkszki-felületen* élnek.
Vagyis megint, a geometria és a fizikai elmélet együtt kell hogy megfeleljen mindannak, amit e kétdimenziós lények műszereikkel és érzékszerveikkel a világból tapasztalnak:

$$\begin{pmatrix} \text{Bolyai–} \\ \text{Lobacsevszki–} \\ \text{geometria} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \text{a világ hőmérséklete} \\ \text{állandó} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{empirikus} \\ \text{tények} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \text{euklideszi} \\ \text{geometria} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \text{a világ hőmérséklete :} \\ T(r) = T_0 \frac{(R^2-r^2)}{R^2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{empirikus} \\ \text{tények} \end{pmatrix}$$

Diák$_2$. Tudna erre egy valóságos példát is mondani? Mert ez így ... ugye ... kétdimenziós lények, miegymás ...?!

Filozófus. Hogyne. Itt van például a Lorentz-elmélet és az Einstein-féle relativitáselmélet esete:

$$\begin{array}{ccccc} (\text{newtoni téridő}) & + & (\text{Lorentz} - \text{elmélet}) & = & (\text{empirikus tények}) \\ (\text{Minkowski} - \text{téridő}) & + & (\text{relativisztikus fizika}) & = & (\text{empirikus tények}) \end{array}$$

Diák$_1$. Mi az a Lorentz-elmélet?

Filozófus. Olvassa el a következőket:

- Bell, J. S. (1987): How to teach special relativity?, In *Speakable and unspeakable in quantum mechanics*, Cambridge University Press, Cambridge.

Tudja, ez az a cikk, ahonnan az Elméleti fizizika példatárukban szereplő „két rakéta kötéllel összekötve" példa származik! Vagy

- Jánossy, L. (1973): *Relativitáselmélet a fizikai valóság alapján*, Akadémiai Kiadó, Budapest.

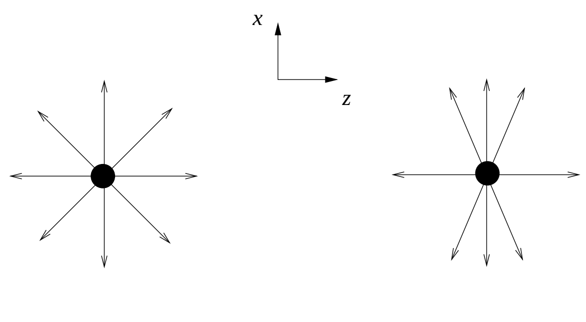
Röviden a következőről van szó: A Lorentz-elmélet feltételezi, amint azt a maxwelli elektrodinamikában tesszük, hogy az elektrodinamikai egyenletei egy adott inerciarendszerben igazak. Ennek az inerciarendszernek abban az értelemben kitüntetett szerepe lesz, hogy az egyenleteket itt tekintjük érvényesnek, és minden további megfontolásunk ezen a rendszeren alapszik. Nevezhetjük ezt az éterhez rögzített vonatkoztatási rendszernek is, de ennek most itt nincs jelentősége. Tekintsünk egy q ponttöltést, amelyik állandó v sebességgel mozog a z-tengely irányában. Egy ilyen töltés elektromágneses tere a Maxwell-egyenletek szerint a következő:

$$\begin{aligned} E_z &= qz' \left(x^2+y^2+z'^2\right)^{-\frac{3}{2}} \\ E_x &= qx \left(x^2+y^2+z'^2\right)^{-\frac{3}{2}} \left(1-\tfrac{v^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}} \\ E_y &= qy \left(x^2+y^2+z'^2\right)^{-\frac{3}{2}} \left(1-\tfrac{v^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}} \\ B_x &= -\tfrac{v}{c}E_y \\ B_y &= \tfrac{v}{c}E_x \\ B_z &= 0 \end{aligned}$$

ahol

$$z' = \frac{z-z_q\left(t\right)}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

és $z_q\left(t\right)$ a töltés helye a t pillanatban. Világos, hogy a $v=0$ esetben visszakapjuk a nyugvó töltés gömbszimmetrikus Coulomb-terét. A mozgó töltés elektromos tere a mozgás irányára merőleges síkban belapul, valahogy így:



Nyugvó töltés A z−irányba mozgó töltés

Most nézzük meg, hogy hogyan módosul egyetlen atomban az elektron pályája az atommag mozgása következtében. Elhanyagolva a mag gyorsulását, az elektron $\mathbf{r}(t)$ pályájára a következő mozgásegyenletet kapjuk:

$$m\,\ddot{\mathbf{r}} = -e\left(\mathbf{E}(\mathbf{r}) + \frac{1}{c}\left[\dot{\mathbf{r}}, \mathbf{B}(\mathbf{r})\right]\right)$$

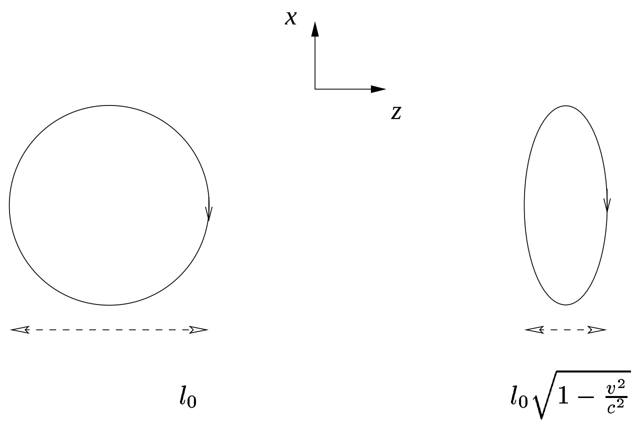
Figyelembe véve a Lorentz-féle, empirikusan ismert, tömegnövekedési formulát:[2]

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{\dot{\mathbf{r}}^2}{c^2}}}$$

a mozgásegyenlet ez:

$$\frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{\dot{\mathbf{r}}^2}{c^2}}}\,\ddot{\mathbf{r}} = -e\left(\mathbf{E}(\mathbf{r}) + \frac{1}{c}\left[\dot{\mathbf{r}}, \mathbf{B}(\mathbf{r})\right]\right)$$

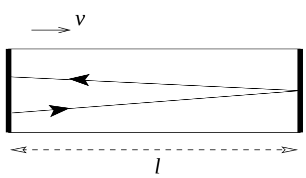
A fenti mozgásegyenletet (például komputeren) megoldva azt találjuk, hogy az elektron pályája szintén „belapul", valahogy így:



Hasonlóképpen kiszámolható a ciklus periódusideje: Ha a nyugalmi periódusidő T_0, akkor a mozgó atomban

$$T = \frac{T_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Vagyis nem csak a Lorentz-kontrakciót, hanem – erre a speciális esetre – az idődilatációt is levezettük. Ugyanerre az eredményre jutunk, ha például egy mozgó doboz két szemközti oldalára szerelt tükrök közötti lézersugár oda-vissza futásának periódusidejét számítjuk ki:



Ha a doboz áll:

$$T = \frac{2l}{c}$$

[2]Tegyük hozzá, a tömegnövekedési formula a relativisztikus fizikában is empirikus ténye a világnak, hiszen a relativisztikus mechanikát a téridő geometriájáról tett állításokat követően külön kell „megalkotnunk", vagyis – mint minden más fizikai elméletet – az empíriára építjük.

Ha mozog (figyelembe véve a doboz hosszának Lorentz-kontrakcióját is):

$$T' = \frac{l\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}{c-v} + \frac{l\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}{c+v} = \frac{T}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

Ezek csak a legegyszerűbb modell-számítások. Az irodalomban ismertek részletesebb anyagmodelleken elvégzett hasonló számolások, és azok is a szokásos eredményekre vezetnek. Vagyis minden jel arra mutat, vonta le Lorentz a következtetést, hogy a mozgó testek elektrodinamikai leírása általában olyan eredménnyel zárul, hogy az objektumok hosszúságai a mozgás irányában

$$l_0 \mapsto l_0\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$$

kontrakciót szenvednek,[3] és a testekben lezajló folyamatok tipikus időintervallumai a nyugalmi helyzetben végbement ugyanilyen folyamatok ugyanazon időintervallumaihoz képest az alábbi formulának megfelelően dilatációt szenvednek:

$$\Delta t_0 \mapsto \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

Lorentz azt is észrevette, hogy az éterhez viszonyított mozgás hatása a fizikai rendszerek viselkedésére egy sajátos törvényszerűséget mutat: nevezetesen a *mozgó* fizikai rendszerre vonatkozó számolás eredménye érdekes alakot ölt, ha az eredményt a következő új változókban fejezzük ki:

$$x' = x \quad y' = y \quad z' = \frac{z-vt}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \quad t' = \frac{t-\frac{vz}{c^2}}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

Az eredmény ugyanis ezekben a változókban kifejezve nem más, mint az ugyanilyen *álló* rendszerre vonatkozó eredmény a

$$t \mapsto t' \text{ és } x, y, z \mapsto x', y', z'$$

helyettesítéssel. Számos esetre ellenőrizve, ez mindig így van. Ennek alapján megfogalmazhatjuk a Lorentz-elvet:

> *A* ***mozgó*** *fizikai rendszer viselkedését megkapjuk, ha az ugyanilyen* ***álló*** *rendszer viselkedésére vonatkozó feladatot oldjuk meg, és az eredményekben elvégezzük a fenti helyettesítést.*

Fontos a későbbiek szempontjából az a könnyen belátható tény, hogy ezek az új változók, nem mások, mint azok az „idő" és „tér" (Az idézőjel – leglábbis Loretz számára – nagyon fontos!) koordináták, melyeket a mozgó objektumhoz rögzített vonatkoztatási-rendszerbeli – vagyis mozgó, és így deformált – órákkal és méterrudakkal mérnénk. Így a Lorentz-elvet a következőképpen is kimondhatjuk:

> *A fizika törvényei olyanok, hogy bármely fizikai rendszer az éterhez viszonyított mozgás hatására úgy deformálódik (értsd ez a mozgás úgy módosítja a rendszer viselkedésére vonatkozó, a fizika szokásos törvényeiből levezetett eredményeket), hogy ebből az eredményből nem állapítható meg egyetlen vonatkoztatási rendszernek sem az éterhez viszonyított sebessége.*

[3] Filozófusunk nem említi, de talán érdemes itt megjegyezni, hogy a Lorentz-kontrakció máig egyetlen kísérleti bizonyítéka szintén az elektromos erővonalaknak az ábrán szemléltetett deformációján alapszik. Egy ködkamrában mozgó töltött részecske ionizációs csatornája az erővonalaknak a részecske sebességére merőleges irányban történő besűrűsödése következtében kiszélesedik. Ezt a kiszélesedést lehet pontosan megfigyelni.

Az „éter” szót itt csak történeti okokból, Loretz kedvéért említjük, valójában tetszőleges inerciarendszerre gondolhatunk. Vegyük észre, hogy ez az elv nem más, mint a relativisztikus fizika Lorentz-kovariancia elvének a Lorentz-elméletebeli megfelelője. Ezért tehát, *amíg a világ empirikus tényeit a relativisztikus fizika leírja, addig a Loretz-elmélet is ugyanezt megteszi!*

Tanulságos végiggondolnunk, hogy hogyan néz ki a világ, a Lorentz-elméletet alapul véve, egy az éterhez képest mozgó megfigyelő számára.[4] Bell a már említett cikkében igen plasztikusan írja ezt le:

> A mozgó megfigyelőre vonatkozó kérdés nem teljesen akadémikus. Nem rakétákban száguldó emberekre kell gondolni, hanem arra, hogy magát a Nap körül keringő Földet jó okunk van – legalábbis az év nagy részében – mozgó vonatkoztatási rendszernek tekintenünk. A lényeg, amit a Lorentz-invariancia alapján a mozgó megfigyelőről meg kell állapítanunk, hogy *azok a vesszős változók, melyeket a fentiekben csupán matematikai segédletként vezettünk be, nem mások, mint amiket egy állandó sebességgel mozgó, ugyanakkor magát nyugvónak képzelő megfigyelő természetes módon a helyes változóknak gondol.* Továbbá, a fizika törvényei ezekben a változókban kifejezve pontosan úgy festenek, mint ahogyan azt a mozgó megfigyelő, még amikor nyugalomban volt, az iskolában megtanulta (feltéve, hogy helyesen tanították meg neki). Egy ilyen megfigyelő, hívjuk őt mondjuk Alice-nek, természetes módon egy hozzá képest nyugvó pontot fog koordinátarendszere origójául választani. Ezzel pontosan rögzítettük a vt tagot a
>
> $$z' = \frac{z - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$
>
> összefüggésben. Alice méterrúdjai pedig pontosan a $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ faktornak megfelelő mértékű Fitzgerald-kontrakciót szenvedik el. De hogy lehet, hogy nem látja, hogy a méterrúdjai összehúzódnak amikor z irányba fekteti őket, és meghosszabbodnak, amint x irányba elforgatja? Ennek az a magyarázata, hogy Alice szemének retinája szintén kontrahálódik, és így ugyanazok a sejtek érzékelik a méterrúd képét, mint ha a rúd is és a megfigyelő is nyugalomban lenne. Hasonlóképpen, Alice nem érzékeli, hogy órája lelassult, mert ezzel együtt lelassult saját gondolkodásának ritmusa is. Továbbá arról sem fog tudni – hiszen magát nyugalomban lévőnek képzeli –, hogy a tőle távolodó és feléje közelítő fényjelek különböző, $c \pm v$, relatív sebességgel haladnak. Ez aztán ahhoz vezet, hogy Alice helytelenül szinkronizálja az egymástól távoli órákat, és végül azt fogja hinni, hogy a
>
> $$t' = \frac{t - \frac{vz}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$
>
> a valódi idő, már csak azért is mert ezzel a választással *úgy tűnik számára*, hogy a fény terjedési sebessége minden irányban c. Ez közvetlenül ellenőrizhető, valamint levezethető a Maxwell-egyenletekből is. Az elektromos térerősség mérése során Alice a saját mérőberendezéséhez képest

[4] Filozófusunk bizonyára a hazai fizikatörténetnek arra a tanulságos epizódjára, a már-már személyes indulatokig fokozódott polémiára utal, amely a magyar nyelvű szakirodalomban a hatvanas években folyt le az einsteini relativitáselmélet egyik jeles hazai elterjesztője, Novobátzky Károly és a már hivatkozott Jánossy Lajos között. Novobátzky (1964) könyvének utószavában éles hangon bírálja Jánossyt és a Lorentz-elméletet. Novobátzky egyik végső ellenérve az volt, hogy a Lorentz-elmélet képtelen konzisztens magyarázatot adni arra az esetre vonatkozóan, amikor egy mozgó megfigyelő egy álló rúd kontrakcióját figyeli meg.

nyugvó próbatöltést fog használni, miáltal valójában $\mathbf{E}$ és $\mathbf{B}$ egy kombinációját fogja mérni. A mozgó töltésekre vonatkozó jól ismert effektusok segítségével definiálva $\mathbf{E}$-t és $\mathbf{B}$-t, valójában $\mathbf{E}'$-höz és $\mathbf{B}'$-höz jut, ahol

$$E'_x = \frac{E_x - \frac{v}{c}B_y}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \quad E'_y = \frac{E_y - \frac{v}{c}B_x}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \quad E'_z = E_z$$

$$B'_x = \frac{B_x + \frac{v}{c}E_y}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \quad B'_y = \frac{B_y - \frac{v}{c}E_x}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \quad B'_z = B_z$$

Mindezek után Alice ellenőrizheti a fizika törvényeit, és örömmel tapasztalhatja, hogy azok pontosan olyanok, mint ahogyan emlékszik rájuk, s hogy az alkalmazott definíciók és eljárások jól működnek. Ha valami mégsem stimmel, akkor hamar rájön, hogy valamelyik berendezése meghibásodott (például megrongálódott a gyorsítás során), és megjavítja. Tekintsünk most egy álló megfigyelőt, Bobot. Mivel Alice magát nyugalomban lévőnek hiszi, úgy gondolja, hogy Bob az, aki mozog. És könnyen kifejezhetjük az Alice által használt változókat a Bob által használtakkal, és viszont, csak v előjelét kell megváltoztatni:

$$x' = x \quad y' = y \quad z' = \frac{z - vt}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \quad t' = \frac{t - \frac{vz}{c^2}}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

$$x = x' \quad y = y' \quad z = \frac{z' + vt'}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \quad t = \frac{t' + \frac{vz'}{c^2}}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

Alice azt állítja majd, hogy Bob méterrúdjai kontrahálódtak, órája lassabban jár, és hogy Bob helytelenül szinkronizálta az egymástól távoli órákat. Alice, megértően úgy gondolja majd, hogy Bob azért használ rossz változókat, mert műszerei Fitzgerald-Larmor-Lorentz-Poincaré-kontrakciót szenvedtek. Ahogyan Alice látja a világot, az logikailag teljesen konzisztens, és tökéletes összhangban van a megfigyelt tényekkel. Bobnak semmi esélye sincs, hogy meggyőzze tévedéséről.

Bell elemzéséből kitűnik, hogy téves az a gyakori ellenvetés, hogy a Lorentz-elmélet nem képes számot adni egy álló rúdnak a mozgó megfigyelő rendszerében tapasztalt kontrakciójáról, hiszen – szól az ellenérv – az álló rúd kontrakcióját nem okozhatták a Lorentz által feltételezett, az éterhez viszonyított mozgásból származó fizikai deformációk. A fenti elemzés világosan megmutatta, hogy az *álló* rúdnak a mozgó megfigyelő által észlelt kontrakciója nagyon is jól értelmezhető, méghozzá éppen a mozgó megfigyelő *mozgó* méterrúdjaiban és *mozgó* óráiban bekövetkezett *fizikai deformációk* következményeként.

Tehát, összegezve:

$$\begin{pmatrix}\text{newtoni}\\ \text{téridő}\end{pmatrix} + \begin{pmatrix}\text{rudak rövidulése}\\ \text{órák lelassulása}\\ \text{és más deformációk,}\\ \text{amiket a mozgásba hozott}\\ \text{testek elszenvednek}\end{pmatrix} = (\text{empirikus tények})$$

$$\begin{pmatrix}\text{Minkowski}-\\ \text{téridő}\end{pmatrix} + (\text{relativisztikus fizika}) = (\text{empirikus tények})$$

Harmadik beszélgetés

Diák$_2$. Milyen jó, hogy pont azt kaptuk házi feladatnak, hogy számoljuk ki, milyen egy mozgó ponttöltés elektromos tere. A filozófia órán is szóba került, legalább most értjük, hogy honnan jött az az eredmény ki. Viszont van itt valami, amit nem értek, sőt, bosszant is! Azt modtad, megcsináltad, kiszámoltad, és ötöst is kaptál rá. Én is megcsináltam, én is ötöst kaptam rá. De azt nem értem, hogy adhattál te be – mert láttam – egy egyoldalas cetlit, amikor énnekem erre az egész éjszakám rá ment, és több mint tizenöt oldalas számolás lett a vége.

Diák$_1$. Nem tudom. Utánanéztem a Landau II. kötetben. Pofon egyszerű: Veszed a nyugvó ponttöltés Coulomb-terét. A kovariancia elvéből következően a mozgó töltés tere a vele együtt mozgó rendszerben szintén a Coulomb-tér. Utána ezt vissza-Lorentz-transzformálod az álló rendszerbe, és kész.

Diák$_2$. A fenébe! Én a Feynman VI. kötetét szedtem elő. Ott persze sokkal bonyolultabban van! Közvetlenül a Maxwell-egyenletekből vezeti le. Először bonyolult levezetések vannak arra, hogyan oldjuk meg a Maxwell-egyenleteket, tetszőleges, időben változó források mellett. Aztán az így kiszámolt retardált potenciálokból, jó bonyolultan kiszámolja a Lienart-Wiechert-potenciálokat, és abból a térerőséget. Ez a vége már olyan macerás, hogy feladja házi feladatnak!

Diák$_1$. Hát, nézd ... mindenki azzal tölti az éjszakáit, amivel akarja ... Egy biztos, mindketten ötöst kaptunk, tehát mindkét módszerrel ugyanannak kellett kijönnie.

Negyedik beszélgetés

Diák$_1$. A tanát úr előadásaiból eddig nekem úgy tűnt, hogy a Lorentz-kontrakció, meg az idő-dilatáció, azok nem „igazi” fizikai változások, hanem csak ... valahogy a különböző vonatkoztatási rendszerekben értelmezett mennyiségek összevetéséből adódnak. Próbáltam utánanézni a könyvekben, de ...

Fizikus. De egymásnak ellentmondó dolgokat olvasott. Ne is folytassa, tudom miről van szó! Sajnálom, ha ez eddig félreérthető volt, úgy látszik, nem voltam elég világos.

Ha mozgásba hozunk egy rudat, az megrövidül. Valóságosan, fizikailag megrövidül. Ha mozgásba hozunk egy órát, az lelassul, valóságosan lelassul. Hiszen, éppen ha igaz a relativitáselmélet, magyarul a Lorentz-transzformáció, akkor abból az következik, hogy a mozgó rúd hossza az együttmozgó rendszerben lesz ugyanannyi, mint az állóredszerbeni hossza volt, akkor, amikor álló helyzetben volt. Vagyis az állórendszerbeli hossza a mozgásba hozás előtt és a mozgásba hozás után nem ugyanaz.

Azért csupán, mert úgy számoljuk ki a hosszát, hogy kiindulunk a Lorentz-kovarianciából, minek alapján a mozgó rúd hosszáról feltesszük, hogy az együttmozgó rendszerben továbbra is l_0, és a mozgásbahozás utáni, új hosszát pedig úgy számoljuk ki, hogy ezt az l_0-t az együttmozgó rendszerből visszatranszformáljuk az eredeti inerciarendszerbe, attól a hossz megváltozásának semmi köze semmiféle Lorentz-transzformációhoz.

Diák$_1$. De hát az együttmozgó rendszer, az számít, nem? Abban pedig nincs változás!

Fizikus. Gondoljon arra, hogy ugyanezt csinálta a ponttöltés terével! A ponttöltés tere valóságosan megváltozik, ha mozgásba hozzuk. A maga szerencsétlen barátja ezt a változást közvetlenül a Maxwell-egyenletekből számolta ki, anélkül, hogy bármiféle relativitáselméletről, egymáshoz képest mozgó rendszerekről, vagy ilyesmikről szó esett volna.

Beszéltünk már arról, hogy a ponttöltés tere úgy változik meg, hogy a mozgására merőleges irányban a térerősség megnő. Ezt a változást kísérletileg lehet látni a kondenzációs csíkok kiszélesedésénél. Nem mondhatja, hogy az nem egy valóságos kiszélesedés. Egy fizikai mennyiség akkor változik meg, ha ugyanabban az inerciarendszerben kezdetben ennyi az értéke, aztán meg annyi. Nem tagadhatjuk le ezt a változást, csak azért, mert esetleg van olyan másik inerciarendszer, amiben ez az érték most ugyanannyi, mint az eredeti rendszerben vett érték volt korábban. Ha maga tövig nyomott gázzal kétszázzal száguldozik az autópályán, nem érvelhet a rendőrnek azzal, hogy végig, az együttmozgó rendszerben a sebessége nulla volt.

Ötödik beszélgetés

Diák$_1$. Azt nem értem, hogy ha egyszer a relativitáselmélet szerint is léteznek azok a deformációk, amiről a Lorentz-elmélet beszél, akkor miért írja Lánczos Kornél, itt a 223. oldalon[5] azt, hogy „A Michelson-Morley kísérlet negatív eredménye arra késztette Lorentzet, hogy feltételezze: az éterhez viszonyított mozgás hatására a mozgás irányába eső távolságok megrövidülnek (ez a Fitzgerald-Lorentz-féle kontrakciós hipotézis), és így kompenzálja azt a jelenséget, amely minden más esetben fellépne." Mi az hogy „feltételezze"? Olyasmit tételez fel, ami a relativitáselmélet szerint is van!

Diák$_2$. Sőt, mi az hogy „feltételezze", mikor, amit feltételez, az egyszerűen kijön a klasszikus fizika törvényeiből! Gyakorlatilag a Maxwell-egyenleteknek a következménye! ...

Én meg azt nem értem, hogy hogy van ez a Poincaré-féle konvencionalizmus a relativitáselmélettel és a Lorentz-elmélettel?!

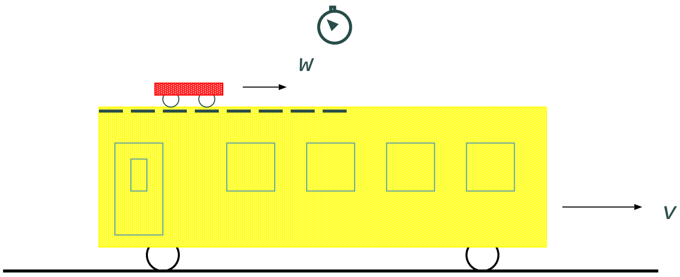
$$
\begin{array}{ccccc}
\begin{pmatrix} \text{newtoni} \\ \text{téridő} \end{pmatrix} & + & \begin{pmatrix} \text{rudak rövidulése} \\ \text{órák lelassulása} \\ \text{és más deformációk,} \\ \text{amiket a mozgásba hozott} \\ \text{testek elszenvednek} \end{pmatrix} & = & (\text{empirikus tények}) \\
\begin{pmatrix} \text{Minkowski}- \\ \text{téridő} \end{pmatrix} & + & (\text{relativisztikus fizika}) & = & (\text{empirikus tények})
\end{array}
$$

Ha egyszer azok a deformációk, amikről a Lorentz-elmélet beszél, a relativitáselmélet szerint is léteznek, akkor a relativisztikus fizika miben különbözik a Lorentz-elmélettől? Valamiben különböznie kell, nem? Mivel a newtoni téridő különbözik a Minkowski-téridőtől! ... Na, ezt a filozófia órán megkérdezzük!

[5] Minden bizonnyal erről a műről van szó: Lánczos K., *A geometriai térfogalom fejlődése*, Gondolat, Budapest 1976.

Hatodik beszélgetés

Filozófus. Na igen. A két elmélet persze azonos egymással, ami a kísérleti tényeket, a megfigyelhető fizikai jelenségeket illeti. De nem azonosak egymással mint ELMÉLETEK! Mert a két elmélet szerint más a téridő geometriája. Ugyanazt a jelenséget az egyik így, a másik úgy írja le. Gondoljanak csak arra, hogy az egyik szerint például összeadódnak a sebességek, a másik szerint nem:



A Lorentz-elmélet szerint:

$$w_L = \frac{nl_0\sqrt{1 - v^2/c^2}}{\frac{\Delta t}{\sqrt{1-v^2/c^2}}}$$

$$V = w_L + v$$

A relativitáselmélet szerint:

$$w_E = \frac{nl_0}{\Delta t}$$

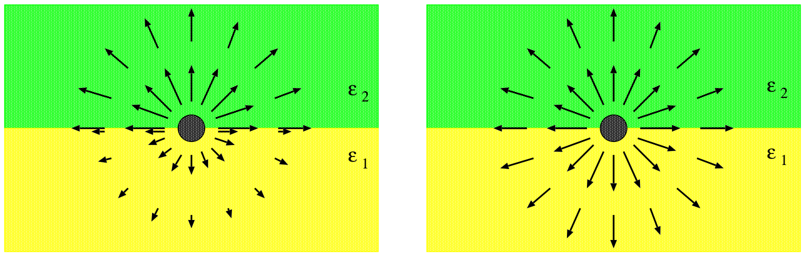
$$V \neq w_E + v$$

Hetedik beszélgetés

Diák$_1$. Megcsináltad azt a példát, hogy a két dielektrikum határán elhelyezett ponttöltés tere milyen?

Diák$_2$. Meg. És ötöst is kaptam rá! Te is?

Diák$_1$. Én is, és az is ötös lett. Na, nézzük meg, kinek mi jött ki!



Diák$_1$. Tanár úr! Ez hogy lehet, hogy mindketten ötöst kaptunk, miközben teljesen más az eredmény? Hogy mást ne mondjak, az egyik mező gömbszimmetrikus, a másik nem!

Fizikus. Urak! Mielőtt hajba kapnának. Nem veszik észre, hogy az egyikőjük az elektromos mezőt az $\overrightarrow{E}$-mezővel, a másikuk a $\overrightarrow{D}$-mezővel jellemezte?

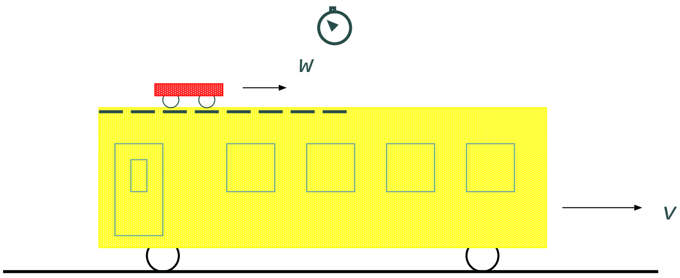
A fizikus nem csak úgy általában írja le a világot! Hanem precízen definiált fizikai mennyiségek nyelvén. Ha vitájuk, vagy kétségeik lennének, hogy a használt elnevezések, fogalmak pontosan mit jelentenek, akkor azt kell tisztázniuk, hogy az adott fizikai mennyiség kísérletileg hogy van definiálva. Ha ezt tisztázták, akkor minden egyértelművé válik.

Diák$_2$. Hát igen! Hülyék voltunk, tanár úr. Viszont lenne egy kérdésem: Igaz ez a tér és idő fogalmára is?

Fizikus. Természetesen! A fizikus számára a tér és idő, pontosabban a tér- és időkoordináta is éppolyan, kísérletileg értelmezett fizikai mennyiség, mint bármi más.

Nyolcadik beszélgetés

Diák$_2$. Mostmár kezdek teljesen becsavarodni. Ha a tér és idő olyan fogalmak, amiket kísérleti, mérési eljárással, operacionális módon értelmez a fizikus, akkor például a sebbességösszeadásos példában, a Lorentz-féle fizikus és az Einstein-féle fizikus nem ugyanazt érti tér- és időkoordináta alatt. És nem ugyanazt érti „a kiskocsi vonathoz viszonyított sebessége” alatt. Egyik sem vitatja, hogy az etalon méterrúd és az etalon óra deformálódik, amikor felviszem a mozgó vonatra. Az egyik a relatív sebesség definíciójában figyelembe veszi ezt a deformációt és vissza-korrigálja, a másik nem.



A Lorentz-elmélet szerint:

$$w_L = \frac{n l_0 \sqrt{1 - v^2/c^2}}{\frac{\Delta t}{\sqrt{1-v^2/c^2}}}$$

$$V = w_L + v$$

A relativitáselmélet szerint:

$$w_E = \frac{n l_0}{\Delta t}$$

$$V \neq w_E + v$$

Diák$_1$. Igen! Persze, hogy w_L és w_E különbözik, és hogy az egyik additív, a másik nem! Különböző mérési utasítással definiáljuk őket, tehát nem ugyanazon fizikai mennyiségekről van szó, csak szerencsétlen módon ugyanúgy nevezi őket a két társaság! Viszont w_L-ről is és w_E-ről is mindkettő ugyanazt mondja.

Diák$_2$. Figyelembe véve tehát a szavak pontos operacionalista jelentését, azt kell mondanunk, hogy *a relativitáselmélet és a Lorentz-elmélet azonos.* Egy az etalonokhoz képest mozgó inerciarendszerben két-két fizikai mennyiséget értelmezhetünk kísérletileg:

$$\begin{array}{ccc} x & : & \begin{array}{c}\text{a deformált méterrúd } n-\text{szer} \\ \text{fér rá a szakaszra}\end{array} & \Rightarrow & x = n\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} \\ t & : & \begin{array}{c} n \text{ másodpercet mutat} \\ \text{a lelassult óra}\end{array} & \Rightarrow & t = \frac{n}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \end{array}$$

Illetve,

$$\begin{array}{ccc} x' & : & \begin{array}{c}\text{a deformált méterrúd } n-\text{szer} \\ \text{fér rá a szakaszra}\end{array} & \Rightarrow & x' = n \\ t' & : & \begin{array}{c} n \text{ másodpercet mutat} \\ \text{a lelassult óra}\end{array} & \Rightarrow & t' = n \end{array}$$

A két elmélet azonos, mert x és t, valamint bármely $f(x,t)$ fizikai mennyiség értékére vonatkozóan ugyanazt állítja, vagyis ezekhez mindkét elmélet ugyazokat az értékeket rendeli. Hasonlóan, mindkét elmélet ugyazokat a számértékeket rendeli x', t' és tetszőleges $f(x', t')$ fizikai mennyiségekhez. Mivel a fizika törvényei kitűnően kifejezhetők mindkét változópár segítségével, formuláinkat akár a vesszős, akár a vesszőtlen változókban felírhatjuk. *A két elmélet között egyetlen különbség van, és* *ez a „tér" és „idő" szavak használata. Az egyik elmélet x, t mennyiségeket nevezi tér- és időkoordinátáknak, míg a másik x', t' mennyiségeket.*

Diák$_1$. És akkor a te problémád is megoldódott a Poincaré-féle sémával! Merthogy nem csak a fizikát, hanem a *téridő geometriáját is ugyanolyannak írja le a két elmélet!*

$$(\text{téridő geometria})_{klasszikus} = (\text{téridő geometria})_{Minkowski}$$

csak más fizikai mennyiségekkel kifejezve.

Diák$_2$. Így van! A „téridő geometriája" a két elmélet szerint látszólag „más", mert a két elmélet mást nevez térnek és időnek. Miközben az elnevezések tisztázása után kiderül, hogy mindkettő ugyanazt mondja! Ez egy őrület! A Lorentz-elmélet és az relativitáselmélet között csak lingvisztikai különbség van!

A relativitáselmélet a Lorentz-elmélethez képest semmi újat nem hozott a fizikába, sem a fizikai törvényeket, sem a téridő geometriáját illetően. Az egyetlen „újítás", melyet Einstein javaslatára 1905-ben a fizikusok elfogadtak, annyi volt, hogy a fizika és a fizikai téridő geometriájának addig is ismert törvényeit új változókban fejezték ki, és ezeket az új változókat onnantól kezdve tér- és időkoordinátáknak kezdték nevezni.

Epilógus

Diák$_2$. Tudod mit találtam a könyvtárban?

Bridgman, P. (1927): *The Logic of Modern Physics*, MacMillan, New York.

Ebben relativitáselméletről szóról szóra ugyanaz van kifejtve, mint amire mi jutottunk a múltkor. Érted? 1927-ben!
És még találtam valamit! Einstein ezt ismerte, és válaszolt rá. Tudod mit? Ezt: „A téridő geometriája a világról való fogalmi gondolkodás kiinduló lépése, egy olyan *választás*, amelyet nem lehet, és nem is szükséges empirikusan alátámasztani."[6]

Diák$_1$. Kabaré!

[6]Einstein, A. (1949): Remarks concenrning the essays brought together in this co-operative volume, *Albert Einstein philosopher-scientist*, P. A. Schilpp (ed.), The library of the living philosophers, Vol. 7. Evanston, Illionis, pp. 665-688. (Oroszul: A. Einstein, Szobranije naucsnih trudov, Nauka, Moszkva 1967, Vol. 4., pp. 294-315.)