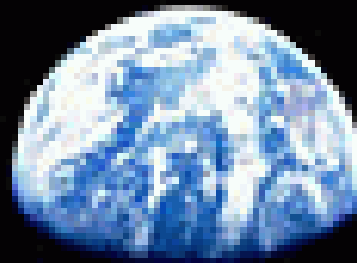
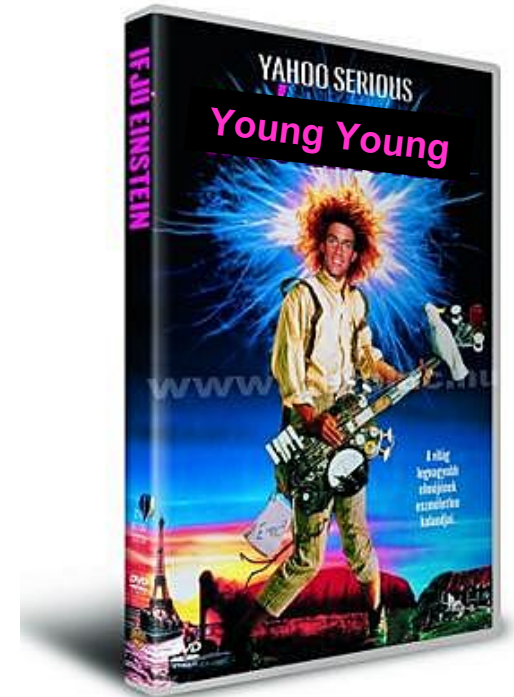
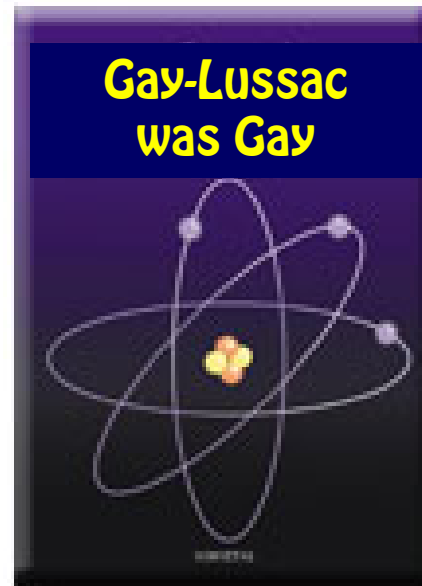
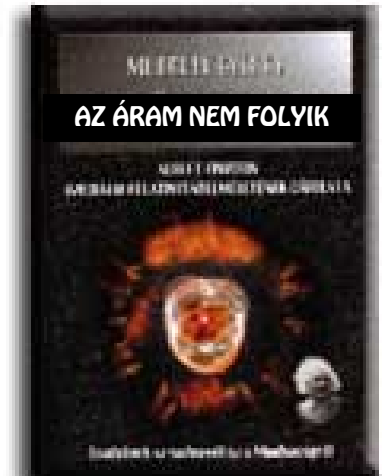


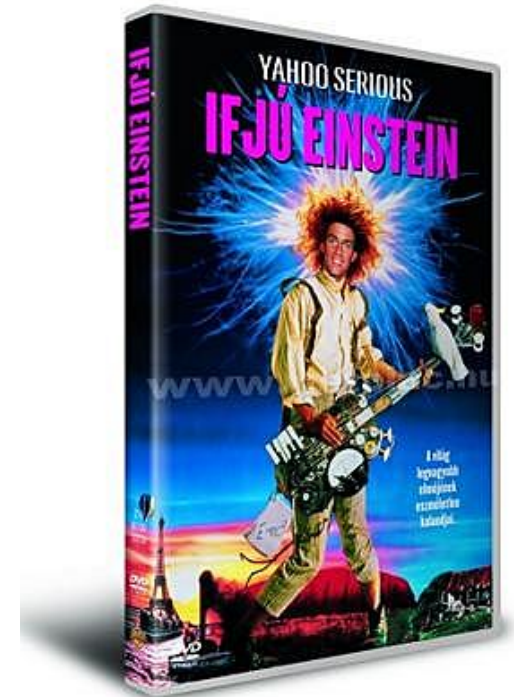
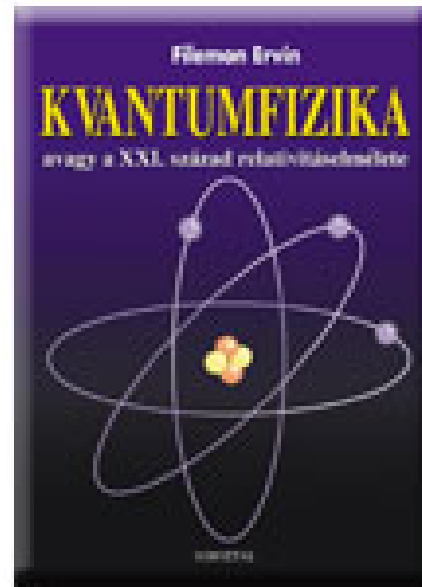
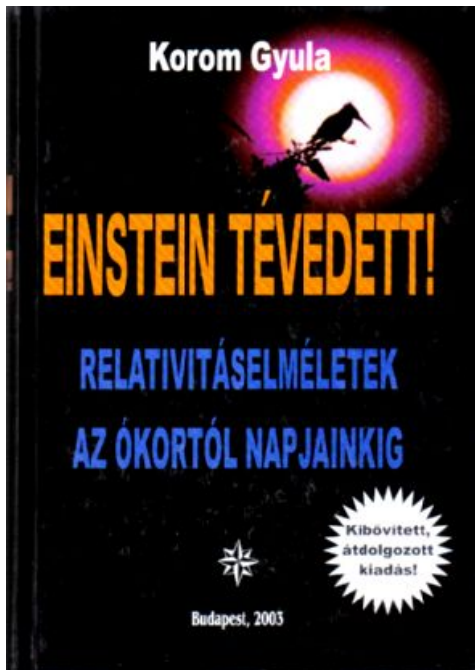
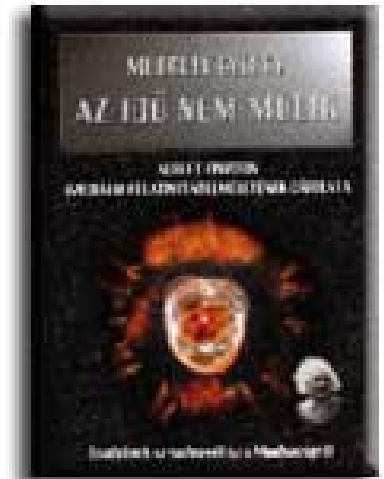
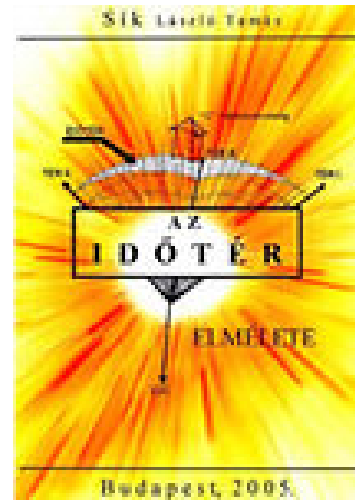
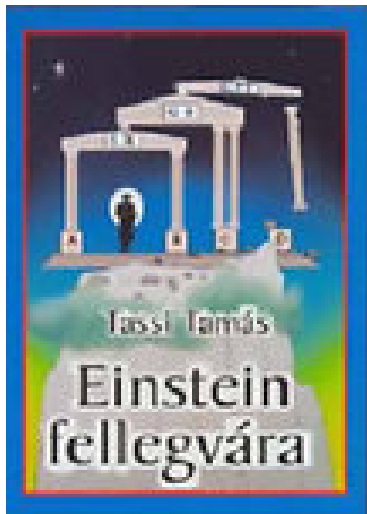
Relativisztikus paradoxonok



Az atomoktól a csillagokig

Dávid Gyula
2009. 01. 15.





Miért pont a relativitáselmélet vált ki száz éve nem szűnő tiltakozást, ellenvéleményeket, ostoba támadásokat?

Miért nem fogadják el úgy, mint a többi fizikai elméletet?

A speciális relativitáselmélet a legalaposabban igazolt fizikai elmélet!

E pillanatban is másodpercenként több százmilliárd kísérlet igazolja, és száz éve nem találtak rá ellenpéldát!

Megváltoztatta a térről, időről, mozgásról kialakult, mélyen belénk gyökerezett fogalmakat

Ellentmond a józan észnek...

A Józan Ész
a hat éves korunk előtt felhalmozódott vagy belénk vert előítéletek halmaza



A legjobb bevezető:
Taylor – Wheeler:
Téridő-fizika



A relativitás elve

Newton első törvénye:

A magukra hagyott testek egyenes vonalú, állandó sebességű mozgást végeznek.

ez is szemben áll a köznapi tapasztalattal!!!

Nem minden megfigyelő látja így:

gyorsuló buszról, körhintáról nézve más a tapasztalat

Ahol igaz Newton első törvénye: az az **INERCIARENDSZER** (IR)

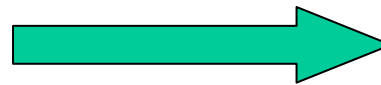
pontosabban: inerciális VONATKOZTATÁSI RENDSZER

(= koordinátatengelyek + időmérő eszközök)

Nem egyetlen inerciarendszer létezik!

Galilei-féle relativitási elv: az inerciarendszerek egyenértékűek

minden IR-ben
ugyanolyanok a fizikai törvények



az IR-ek
megkülönböztethetetlenek!
nincs kitüntetett, abszolút IR !



Szimmetriák és transzformációk

K rendszerről áttérünk K'-re:

transzformáció

Ha ekkor a fizikai törvények ugyanolyanok maradnak:

a K rendszerben egyenletes mozgást végző test ugyanezt teszi a K' rendszerben is (csak más sebességgel, más irányba, más kezdőponttal)

szimmetria

A mechanikai szimmetriatranszformációk (IR-t IR-be visznek át):

transzformáció

szimmetriaelv

megmaradási tétel

a KR kezdőpontjának eltolása

a térnek nincs középpontja:
a tér homogén

lendület

a KR tengelyeinek elforgatása

a térben nincsenek kitüntetett irányok: a tér izotróp

perdület

az időszámítás kezdőpontjának eltolása

az időnek nincs közepe:
az idő homogén

energia

üljünk át egy állandó sebességgel mozgó vonatra (Galilei-transzformáció)

Galilei-féle relativitási elv

(tömegközéppont)



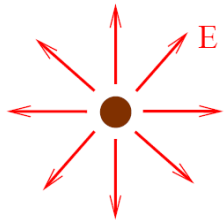
Csak a mechanikában érvényesek a szimmetriaelvek?

A XX. század fizikája a szimmetriák diadalútja
Wigner Jenő (Nobel-díjas): *Szimmetriák és reflexiók*

Új fizika a 19. század végén:

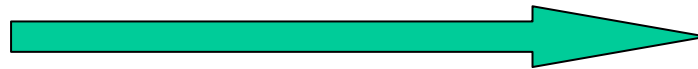
elektrodinamika

a Maxwell-egyenletek **NEM** Galilei-invariánsak:

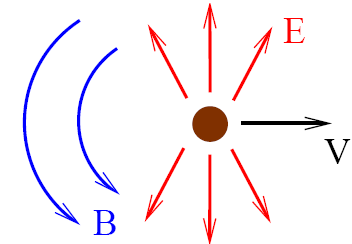


Galilei-transzformáció

álló ponttöltés



mozgó ponttöltés



csak elektromos mező

elektromos és mágneses mező is

Eszerint léteznie kell egy **ABSZOLÚT nyugvó IR**-nek... ez lenne az **ÉTER**

ebben az IR-ben **érvényesek** az elektrodinamika törvényei, a Maxwell-egyenletek
a többi IR-ben nem: az IR-ek elektrodinamikai vagy optikai mérésekkel megkülönböztethetők!

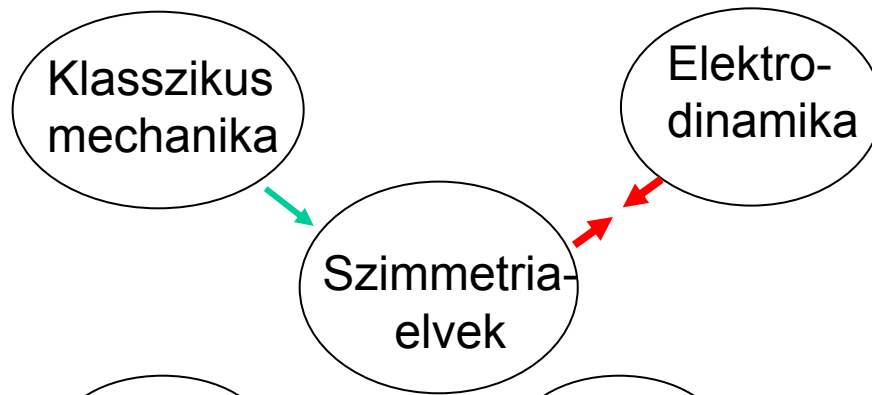
Keressük meg az étert: mérjük meg a Föld éterhez képesti sebességét!

Michelson és Morley kísérlete 1883: **nincs effektus, az étert nem találják....**

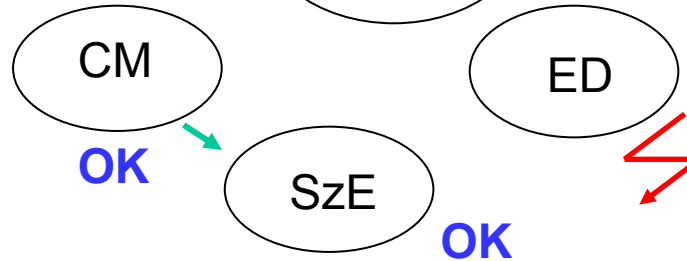
Sőt: furcsa tapasztalat: a fény **minden IR-ben** ugyanakkora **c** sebességgel terjed!



Ellentmondások és feloldásuk

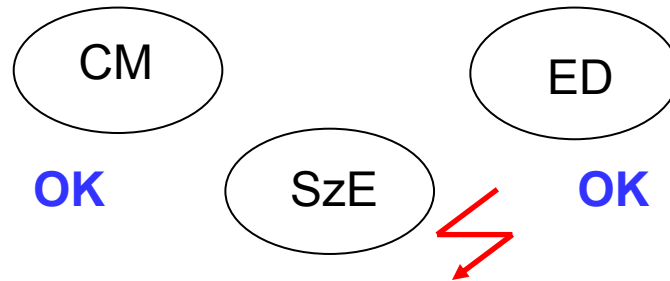


a) Triviális feloldás:



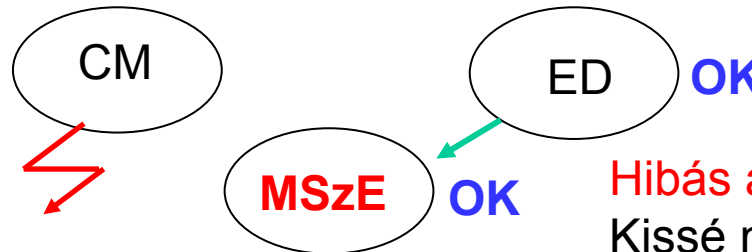
hibás
(új kiforratlan elmélet)

b) Szokásos megoldás:



Nincs Galilei-invariancia.
Van kitüntetett KR: **ÉTER**

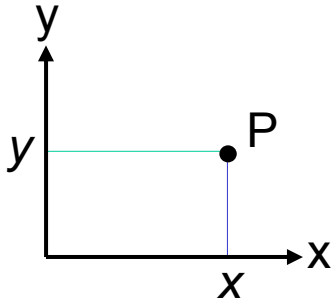
c) Meglepő,
új megoldás:
**speciális
relativitáselmélet**



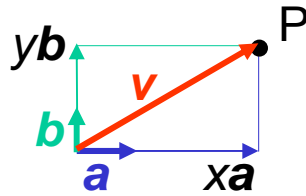
Hibás a klasszikus mechanika!
Kissé módosított szimmetriaelvek:
Galilei helyett **Lorentz-invarancia**



Koordináták és koordinátarendszerek

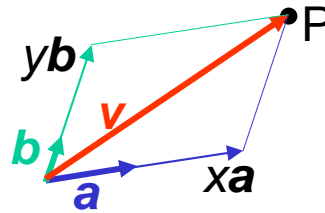


derékszögű
koordinátarendszer

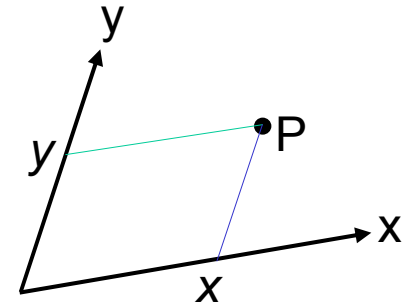


$$\mathbf{v} = x\mathbf{a} + y\mathbf{b}$$

vektorok felbontása



$$\mathbf{v} = x\mathbf{a} + y\mathbf{b}$$



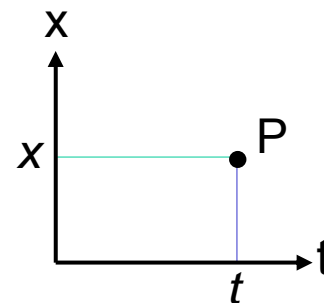
ferdeszögű
koordinátarendszer

A koordináták leolvasása:
a **MÁSİK** koordinátatengellyel párhuzamos
vetítősugarakkal,
amelyek a ponttól az adott tengelyig tartanak



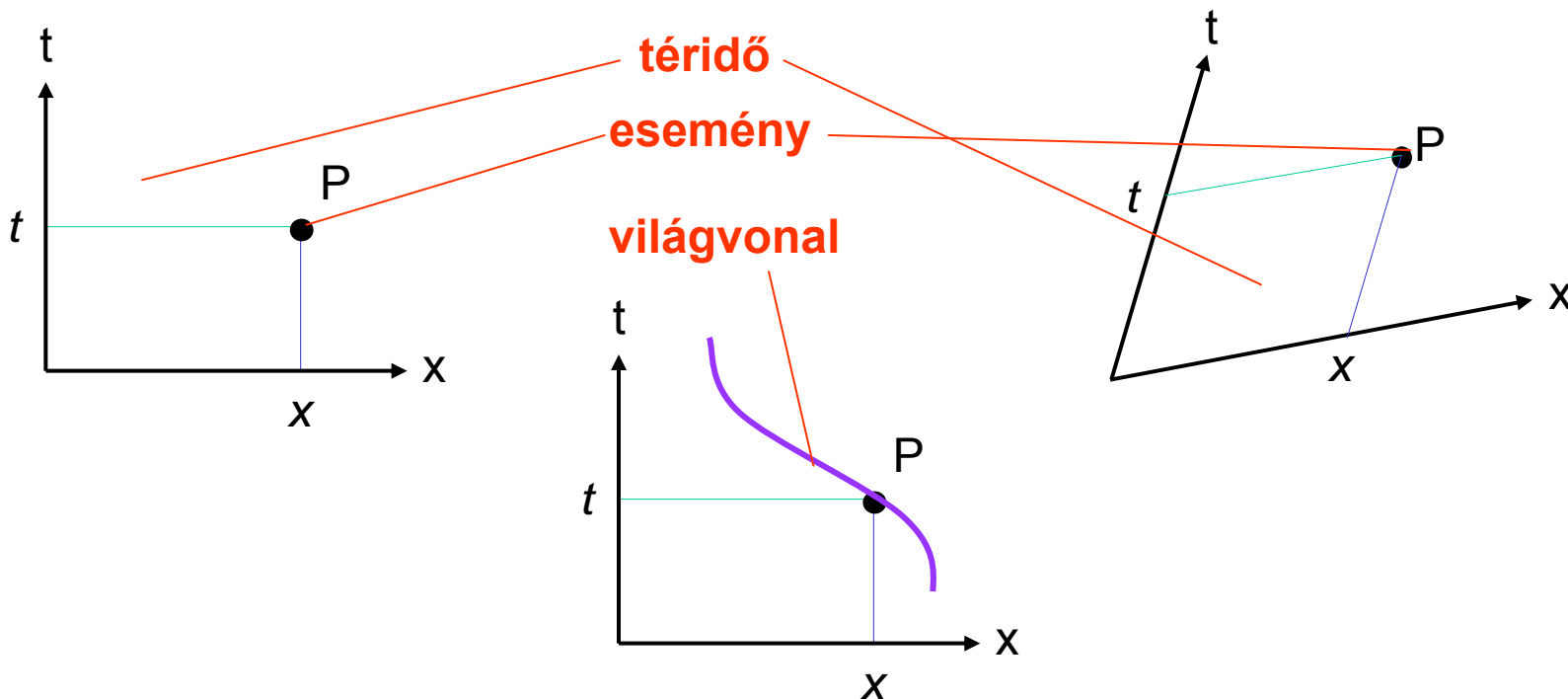
Téridő

$x - t$ koordinátarendszer: tkp. iskolai út—idő-diagram



Fizikusok vagyunk, vagy mi a szösz... cseréljük fel a tengelyeket!

(a matematikusok nem szokták...)



téridő

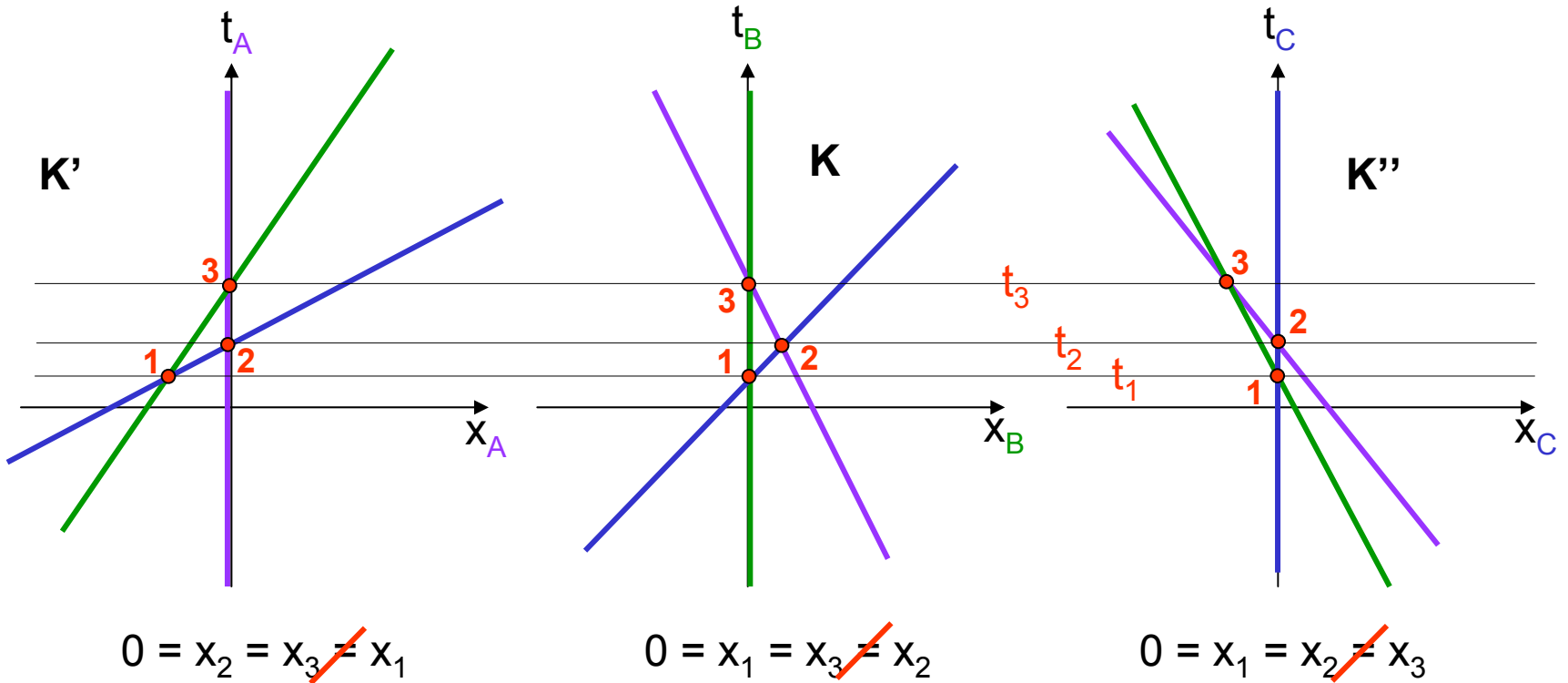
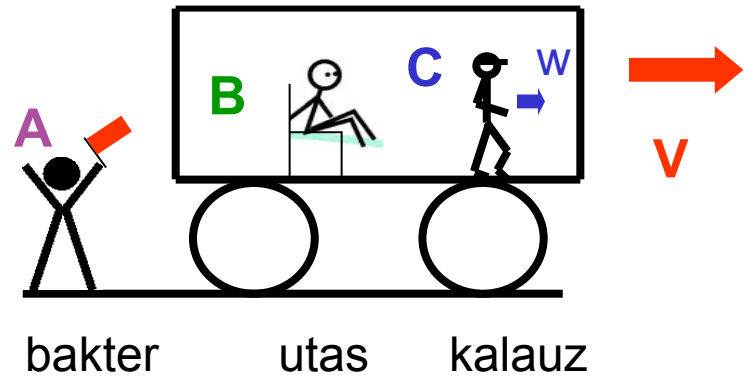
esemény

világvonal

Galilei-transzformáció

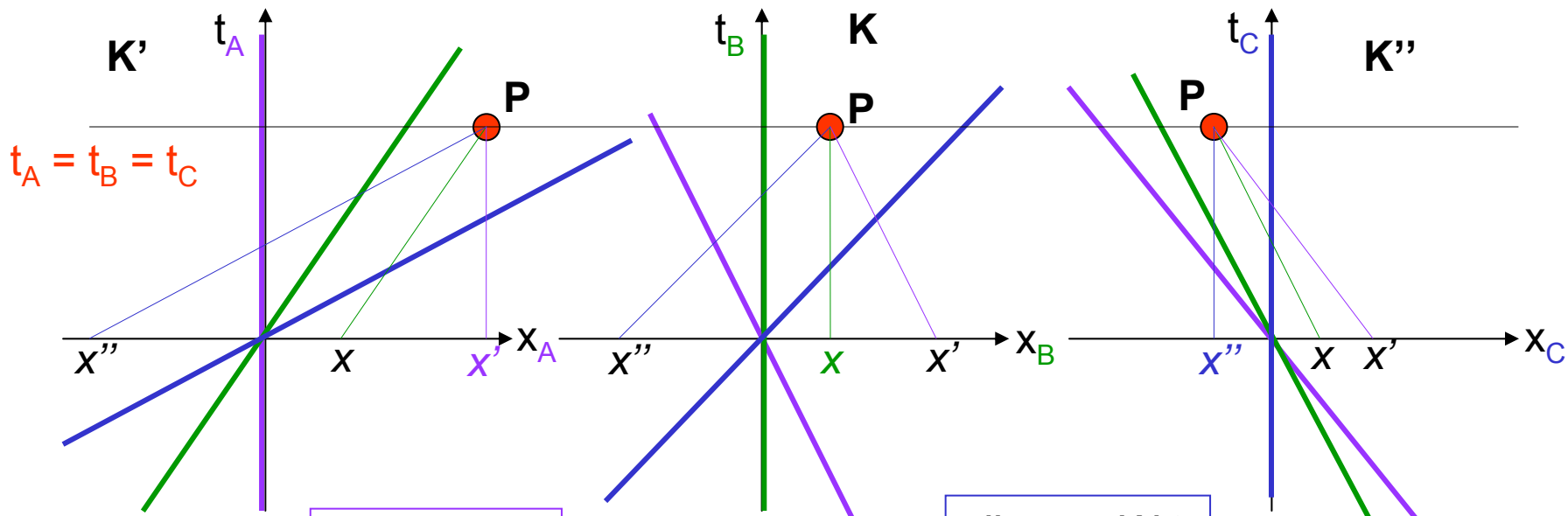
$$t_A = t_B = t_C$$

newtoni
abszolút idő



Események koordinátái

Az egyszerűség kedvéért tegyük fel, hogy az 1, 2 és 3 események egybeesnek. Legyen ez az origó.



a P esemény különböző koordinátái közti kapcsolatok:

$$\begin{aligned} x' &= x + V t \\ x &= x' - V t \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x'' &= x + W t \\ x &= x'' - W t \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x'' &= x' + U t \\ x' &= x'' - U t \end{aligned}$$

$$U = V + W$$

newtoni abszolút idő

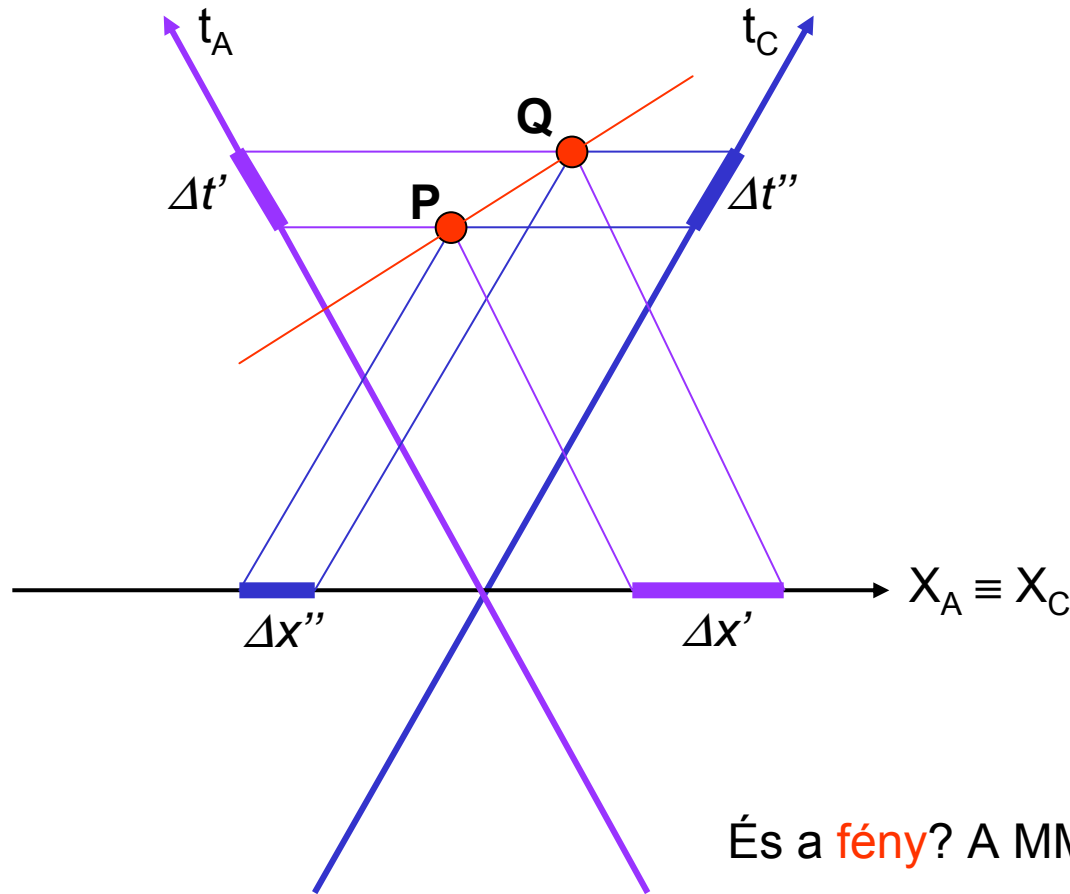
Sebesség-összeadás Galilei (és a józan ész) szerint

$$t_A = t_B = t_C$$



Sebességek mérése

két esemény közt!



PQ pl egy madár pályája

$$\Delta t'' = \Delta t'$$

$$\Delta x'' \neq \Delta x'$$

$$V'' = \frac{\Delta x''}{\Delta t''} \neq \frac{\Delta x'}{\Delta t'} = V'$$

Az **NEM LEHET**, hogy egy objektum két, egymáshoz képest mozgó IR-ben ugyanakkora sebességűnek látsszon!

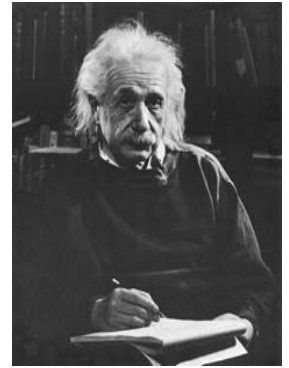
Hát még **MINDEN** IR-ben...

És a **fény**? A MM-kísérlet szerint ezt teszi...



Einstein zseniális trükkje (1905)

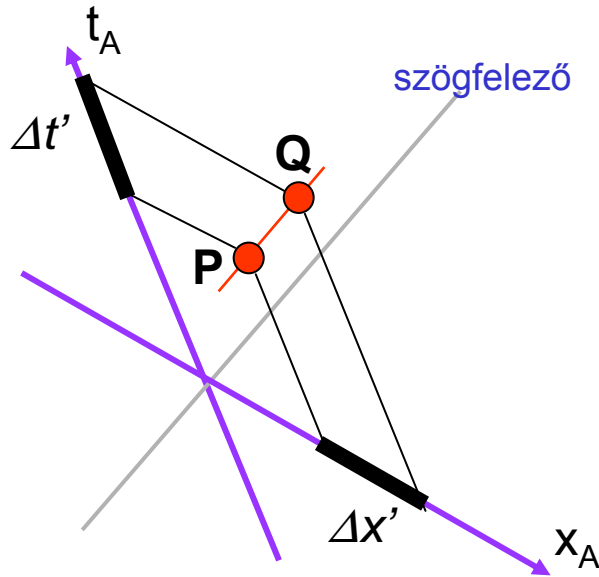
Albert Einstein
(1879-1955)



Hogy tudnánk lerajzolni azt a tapasztalatot, hogy valami **MINDEN IR-hez képest** ugyanazzal a **c** sebességgel halad?

(Mostantól olyan egységrendszerben dolgozunk, amelyben $c = 1$, pl. az időt évben, a távolságot fényévben mérjük.)

Einstein trükkje: változtassuk meg az x tengelyt is!

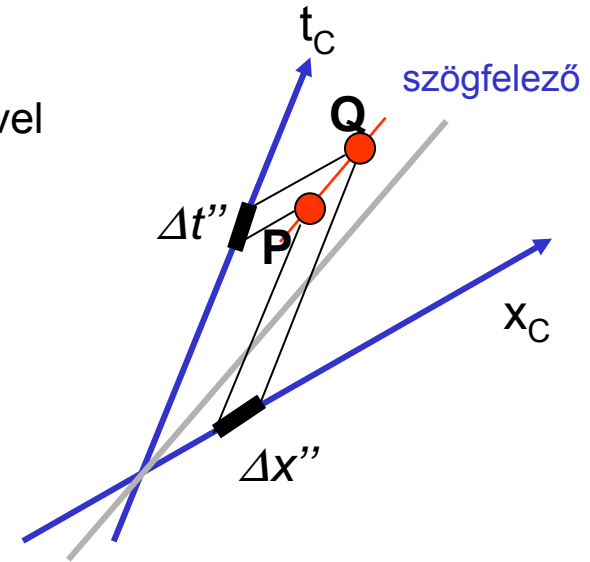


PQ a fény pályája
párhuzamos a szögfelezővel

$$\cancel{\Delta x''} \neq \Delta x' \quad \cancel{\Delta t''} \neq \Delta t'$$

$$\Delta x' = \Delta t' \quad \Delta x'' = \Delta t''$$

$$V'' = \frac{\Delta x''}{\Delta t''} = 1 = \frac{\Delta x'}{\Delta t'} = V'$$

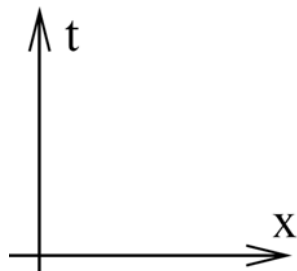


A PQ mozgás sebessége mindkét IR-ben $1 = c$!

Ennek ára: $\cancel{\Delta t''} \neq \Delta t'$ - megszűnt a newtoni abszolút idő!!!

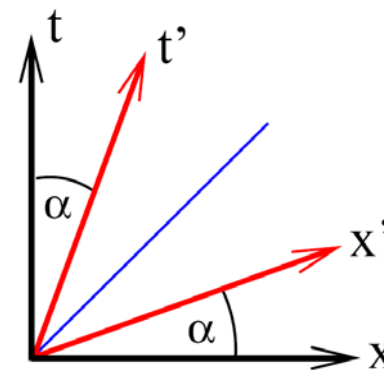


Koordináta-tengelyek

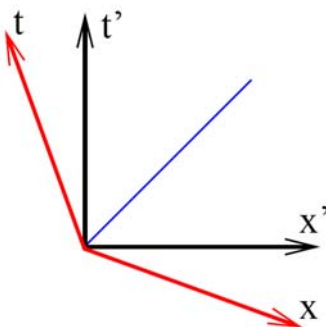


t' tengely: az $x' = 0$ pontok mértani helye

x' tengely: az $t' = 0$ pontok mértani helye



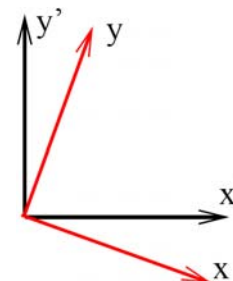
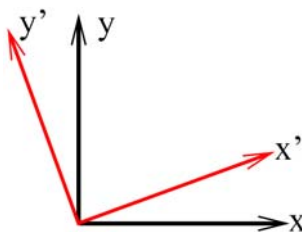
K' rendszerből nézve:



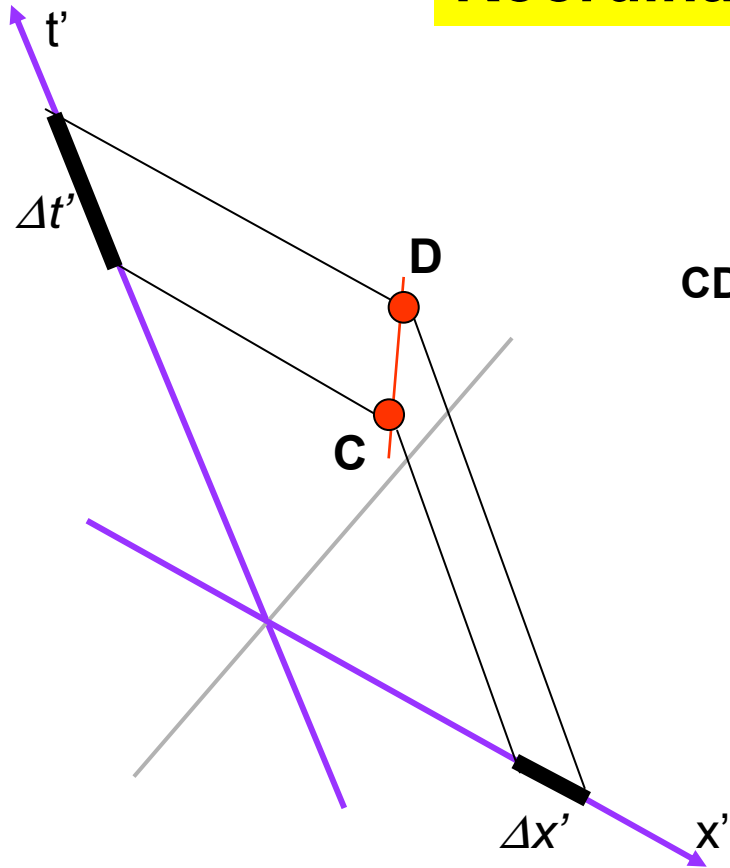
A szögfelező közös!

Az α szög csak az ábrán létezik!

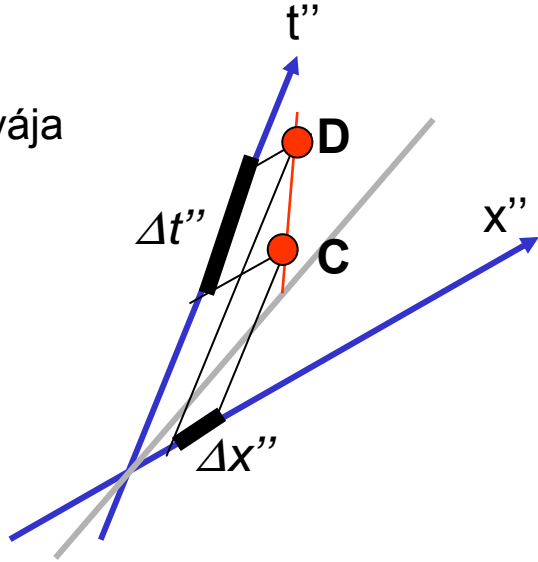
Emlékeztető: forgatás



Koordináta-átszámítás



CD egy test pályája



oda:

$$\begin{aligned} \Delta x'' &= f(U) \Delta x' + g(U) \Delta t' \\ \Delta t'' &= h(U) \Delta x' + i(U) \Delta t' \end{aligned}$$

Ez a **Lorentz-transzformáció**

Az $f(U)$, $g(U)$, $h(U)$ és $i(U)$ függvények az eddigiek alapján egyértelműen meghatározhatók.

vissza:

$$\begin{aligned} \Delta x' &= f(-U) \Delta x'' + g(-U) \Delta t'' \\ \Delta t' &= h(-U) \Delta x'' + i(-U) \Delta t'' \end{aligned}$$



Sok IR esete

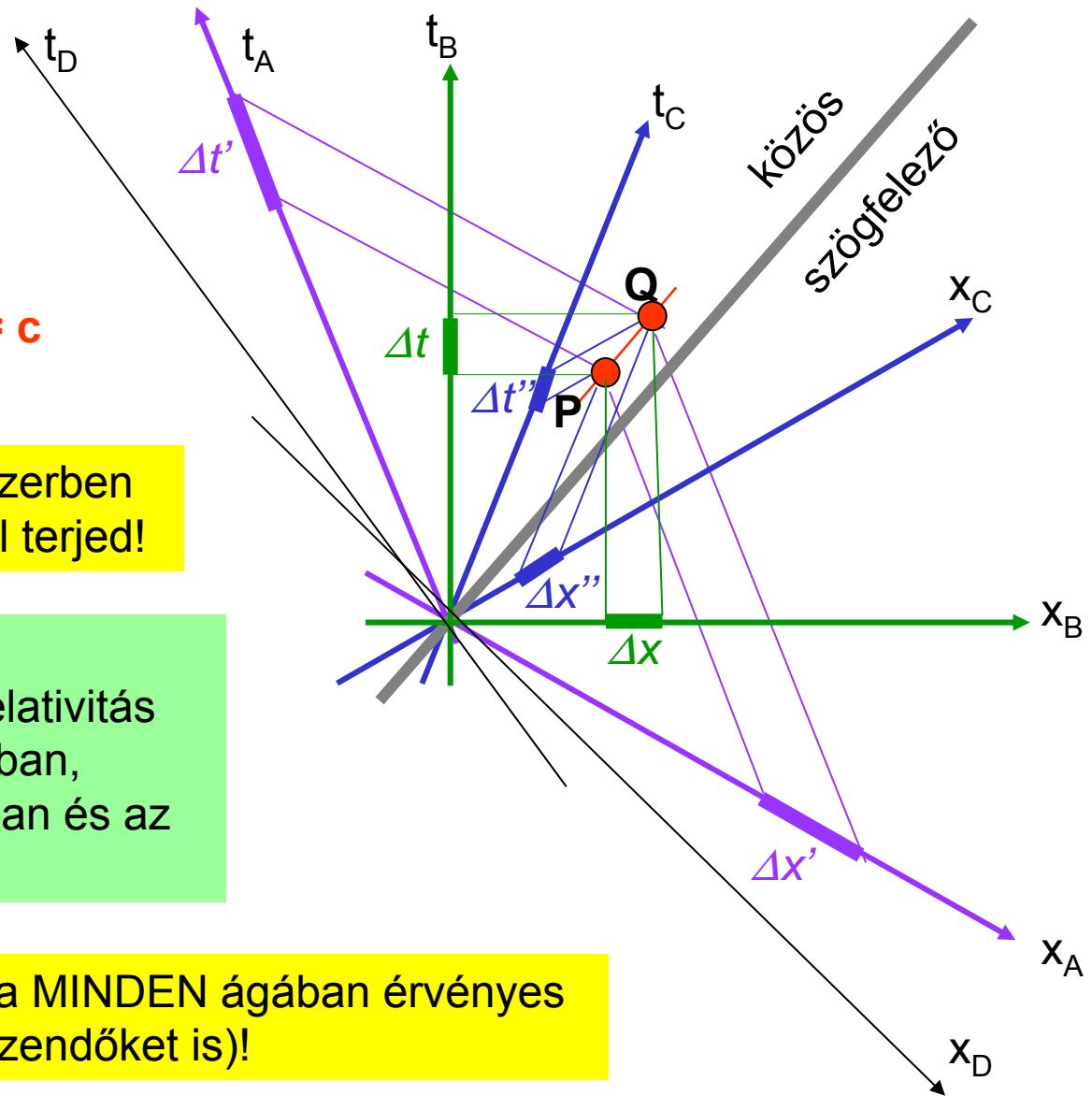
PQ a fény pályája

$$V = V' = V'' = V''' = \dots = 1 = c$$

A fény minden inerciarendszerben ugyanakkora c sebességgel terjed!

Tehát az inerciarendszerek egyenértékűsége, azaz a relativitás elve nemcsak a mechanikában, hanem az elektrodinamikában és az optikában is érvényes!

Sőt: a relativitás elve a fizika MINDEN ágában érvényes (beleértve a majdan felfedezendőket is)!

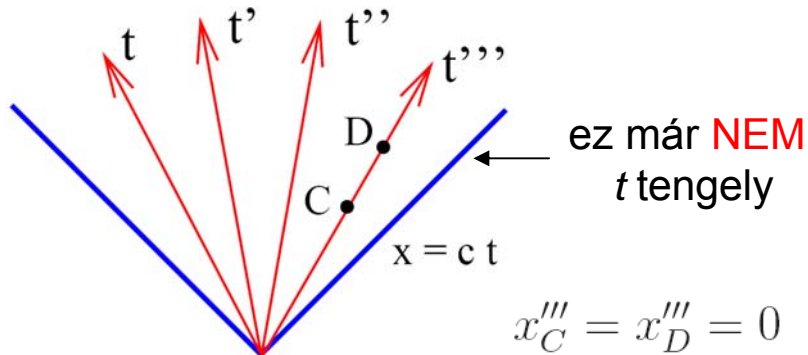


Ez a **speciális relativitáselmélet** két alapfeltevése.



Maximális sebesség

lehetséges t tengelyek:



Az inerciarendszerek relatív sebessége $< c$

Egy t tengely lehet egy
állandó sebességű test
világvonala

$$\Delta x''' = 0$$
$$\Delta t''' > 0$$



$$\Delta t > \Delta x$$

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} < 1 \quad (= c)$$

De minden mozgó testre rögzíthető (pillanatnyi) inerciarendszer!

A testek relatív sebessége $< c$

A c állandónak ez a fizikai jelentése: a maximális sebesség.
Az csak „véletlen”, hogy a fény is pont ezzel a sebességgel halad...
A relativitáselmélet **NEM a fényel** foglalkozik,
hanem a téridővel és a mozgásokkal!



Sebességek összeadása

látszólagos paradoxon:

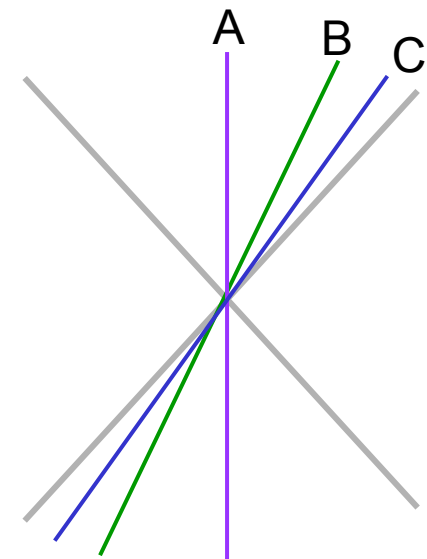
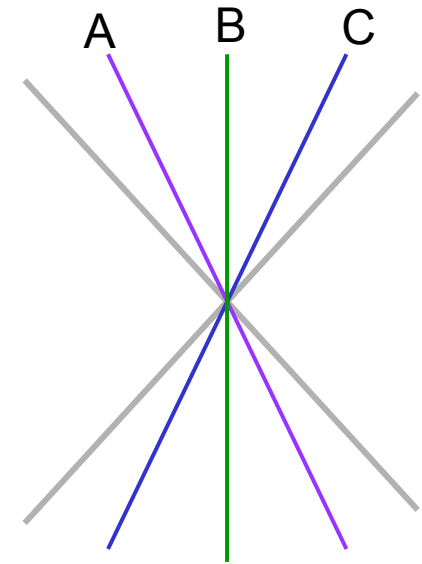
a B testhez képest
az A test balra mozog $V = 3c/4$ sebességgel,
a C test pedig jobbra $W = 3c/4$ sebességgel

Klasszikus számolás a józan ész alapján:
az A testhez képest a C test jobbra mozog
 $U = V + W = 3c/2 > c$ sebességgel...

Ezzel szemben a relativitáselméletben:
az A testhez képest a C test jobbra mozog
 $U = 24c/25 < c$ sebességgel!

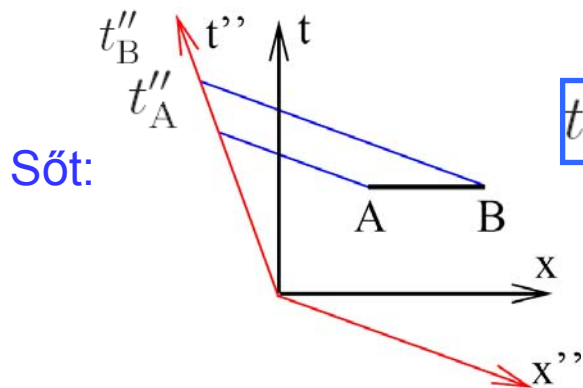
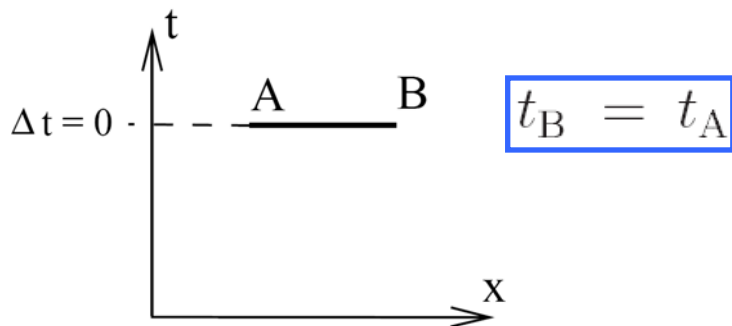
Einstein-féle sebességösszeadás:

$$U = \frac{V + W}{1 + VW} = \frac{3/4 + 3/4}{1 + (3/4)(3/4)} = 24/25 < 1$$



Az egyidejűség relativitása

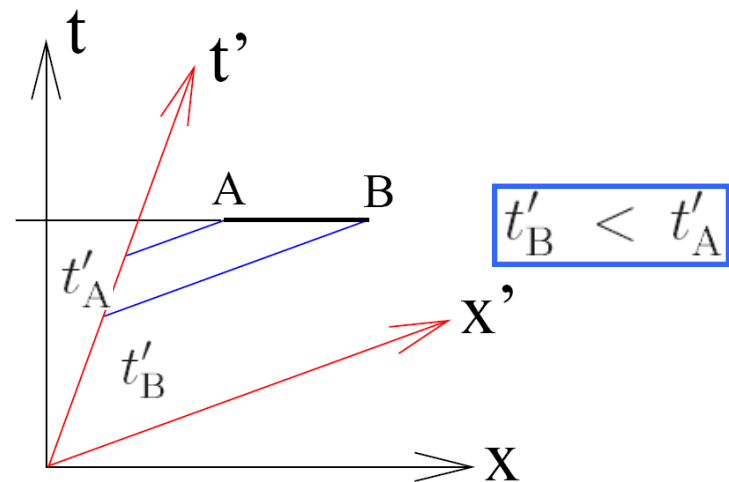
Ez az „alapparadoxon”: minden más „paradoxon” ebből következik!



Okság: lehet, hogy korábban születtem, mint a saját nagymamám???

DE: **Vannak olyan C, D események is, amelyre: $t_D > t_C$ MINDEN inerciarendszerben!**

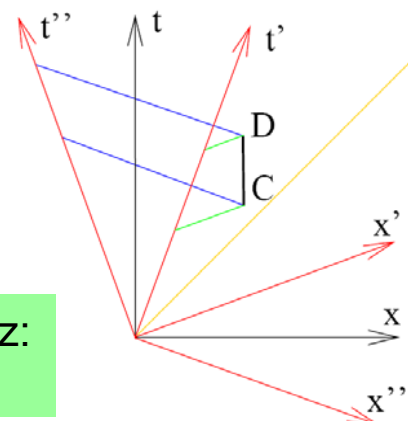
Áll: ha a CD szakasz meredeksége > 1 , ez minden IR-ben így lesz: C mindenki szerint korábban van, mint D



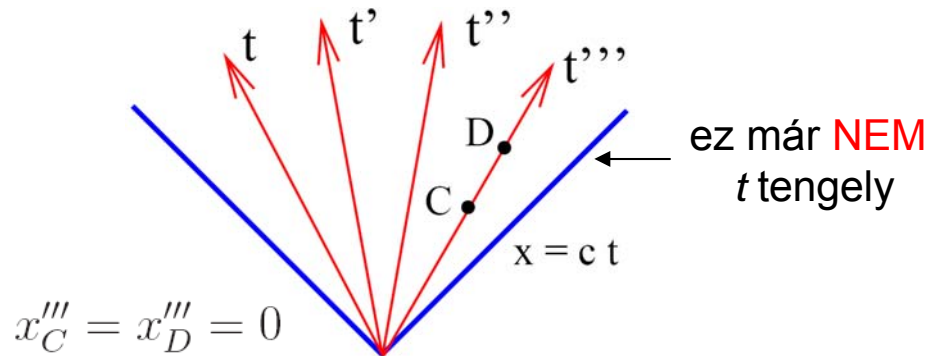
Vannak olyan A, B események:

$t'_B < t'_A$
 $t_B = t_A$
 $t''_B > t''_A$

attól függ, ki nézi



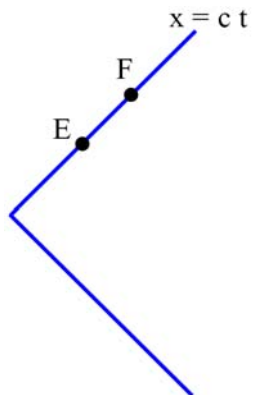
lehetséges t tengelyek:



C és D ugyanott vannak, egymás után
időszerűen elválasztva:

$$c^2 \Delta t^2 - \Delta x^2 > 0$$

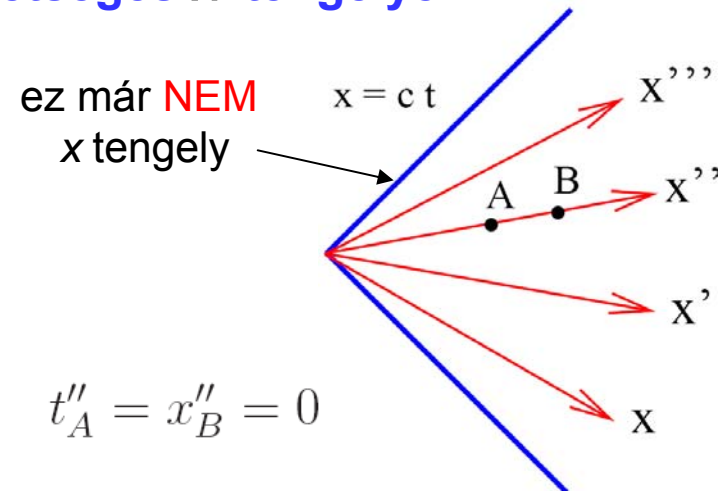
invariáns állítások: minden megfigyelő így látja



Nincs $\left\{ \begin{array}{l} \text{sem olyan KR, ahol egyszerre lennének} \\ \text{sem olyan KR, ahol ugyanott lennének} \end{array} \right.$

fényszerűen vannak elválasztva $c^2 \Delta t^2 - \Delta x^2 = 0$

lehetséges x tengelyek:

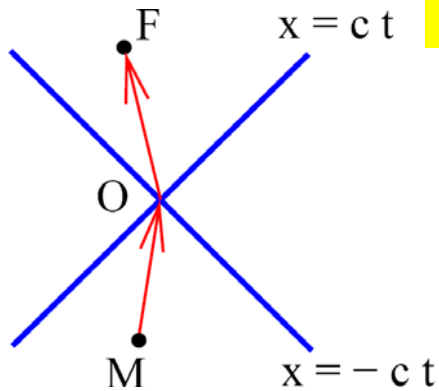


A és B ugyanakkor vannak, egymás mellett
térszerűen elválasztva:

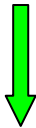
$$c^2 \Delta t^2 - \Delta x^2 < 0$$



Oksági kapcsolatok



$$c^2 t_F^2 - x_F^2 > 0$$



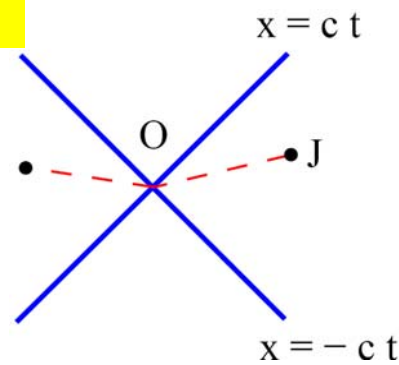
lehetséges hatás:

c-nél kisebb sebességgel: $\left| \frac{x_F}{t_F} \right| < c$

kauzális kapcsolat:

$M \rightarrow O \rightarrow F$

időszerűen elválasztott pontok



nem lehet hatást közvetíteni

$$c^2 t_J^2 - x_J^2 < 0$$

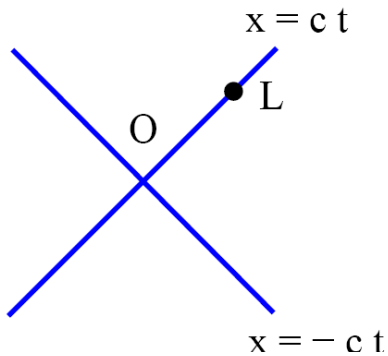


térszerűen elválasztott pontok

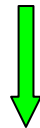
$$\left| \frac{x_J}{t_J} \right| > c$$

több dimenzióban

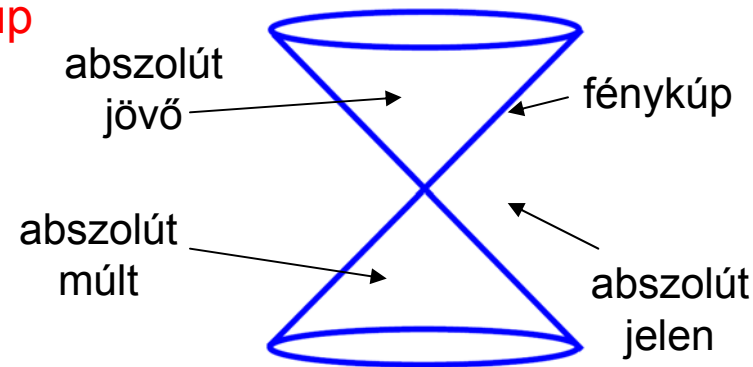
fényszerűen elválasztott pontok halmaza a **fénykúp**



$$c^2 t_L^2 - x_L^2 = 0$$



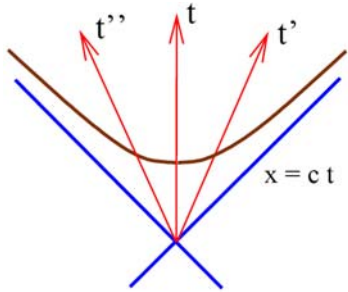
$$\left| \frac{x_L}{t_L} \right| = c$$



relativitás helyett **„abszolútitás”**-elmélet



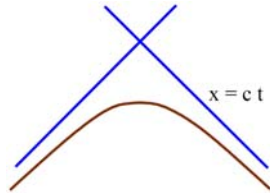
Egységek



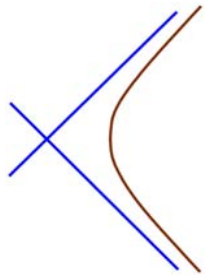
Keressük azon pontokat, amelyek valamely K' KR-ben $t' = 1$ időegységgel vannak az origó után,
 $t' = 1, x' = 0$ ($c = 1$) \longrightarrow

$$t^2 - x^2 = 1$$

hiperbola

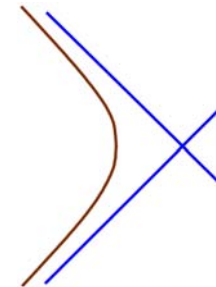


Pontok $t' = -1$ egységgel az origó előtt,
 $t' = -1, x' = 0$

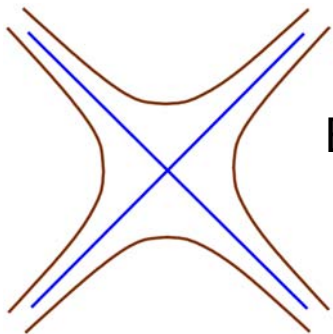


Mely pontok vannak valamely KR-ben
 $x' = 1$ egységre az origótól jobbra?
 $t' = 0, x' = 1$

$$\longrightarrow t^2 - x^2 = -1$$

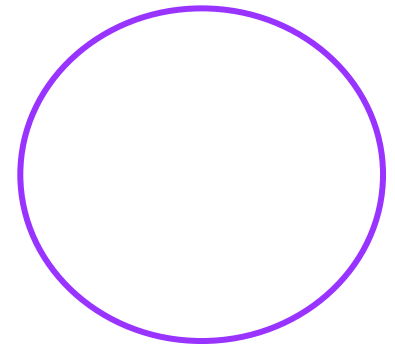


És balra?

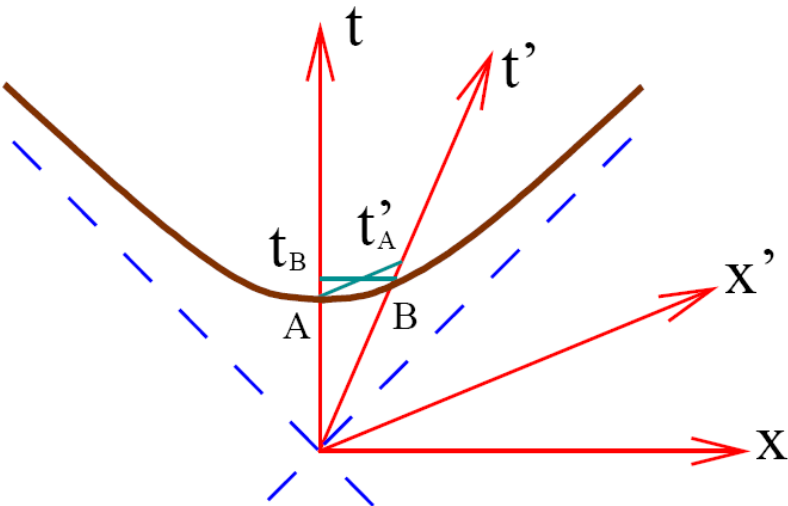


Ezek együtt az origótól egységnyi „távolságra”
 lévő pontok halmaza: **indikátrix-hiperbola**

Euklideszi megfelelője az egységkör:



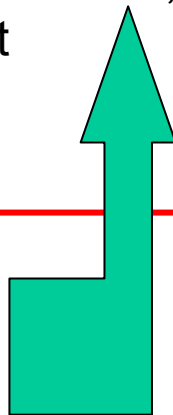
„Időlassulás”



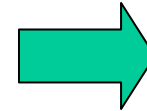
Az időlassulás „paradoxona”

Ha a **K'-ben lassabban telik az idő**, mint K-ban, akkor hová lett az inerciarendszerek egyenértékűsége?

Ez az állítás pongyola, sőt hamis: attól függ, mely eseményeket nézzük!



$$\begin{matrix} t'_B = 1 \\ x'_B = 0 \end{matrix}$$



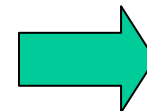
$$t_B > t_A = 1$$

A K megfigyelő szerint a hozzá képest mozgó K' egységnyi időhöz tartozó B eseményéig több mint egységnyi idő telt el:

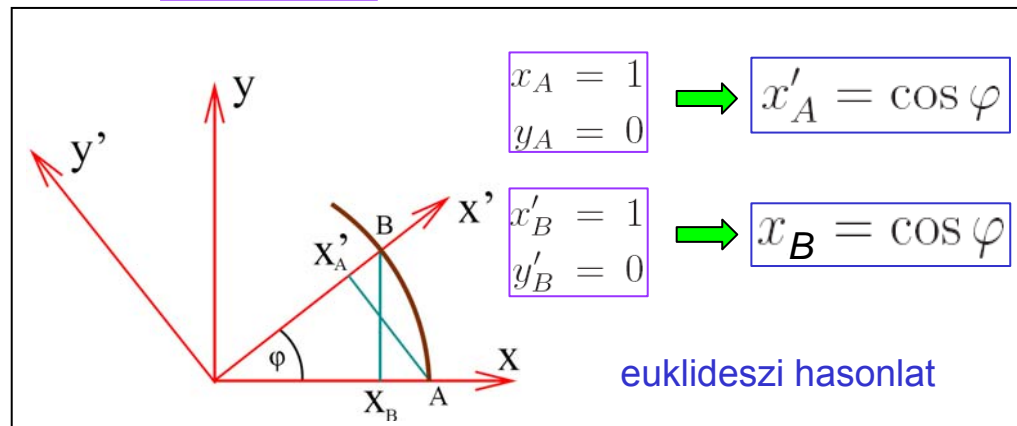
röviden (és pongyolán):
a mozgó KR-ben lassabban telik az idő

Nincs paradoxon, a helyzet szimmetrikus!
Csak **más eseményeket** nézünk...

$$\begin{matrix} t_A = 1 \\ x_A = 0 \end{matrix}$$



$$t'_A > t'_B = 1$$

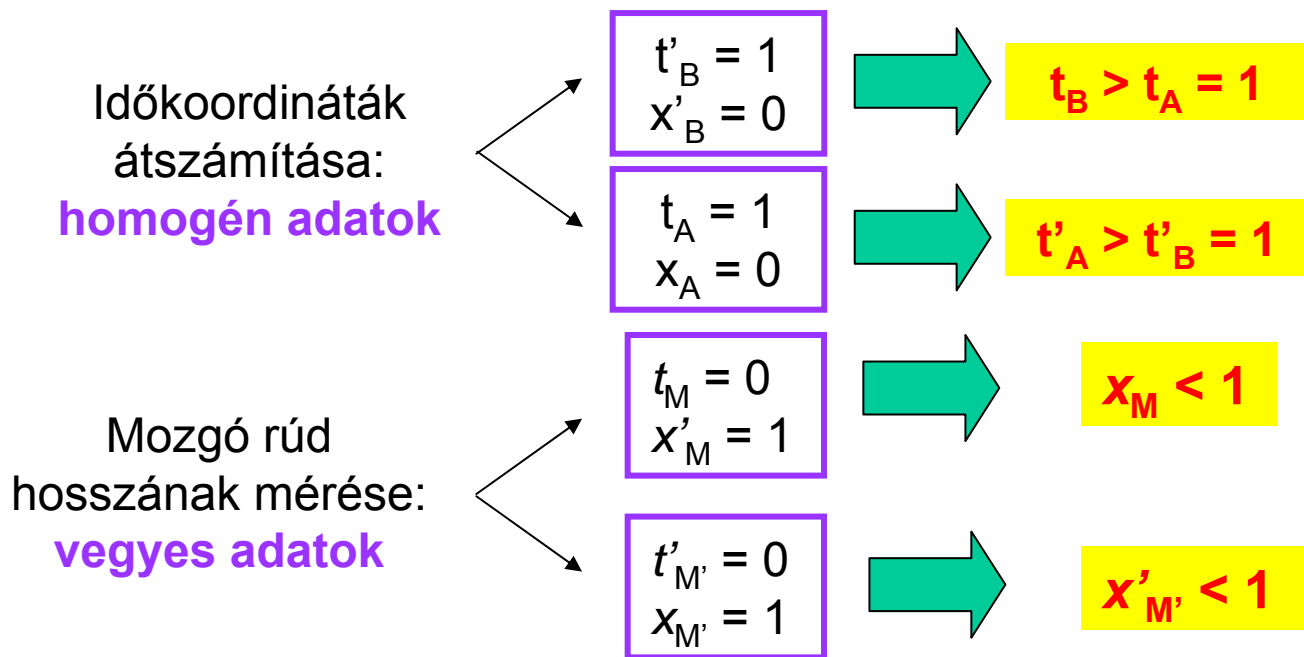


Egy újabb paradoxon:

hová lett a tér és az idő szimmetriája?

hiszen a mozgó rendszerben: - az idő megnyúlik
- a méterrúd viszont összemegy?

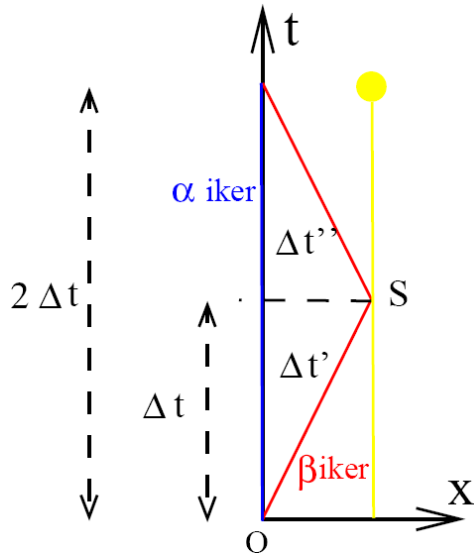
Nincs paradoxon: **más a mérések elve!**



A „Lorentz-kontrakció” **nem** valóságos fizikai **esemény!** A méterrúd nem nyomódik össze!
Nem történik semmi: **másképp** olvassuk le az adatokat, **a valóság más vetületét mérjük.**

Ikerparadoxon

Ki lesz a fiatalabb? Az űrutazó vagy a Földön maradt iker?



Válasz: a β iker lesz fiatalabb.

Ellenvetés: hová lett a KR szimmetria?

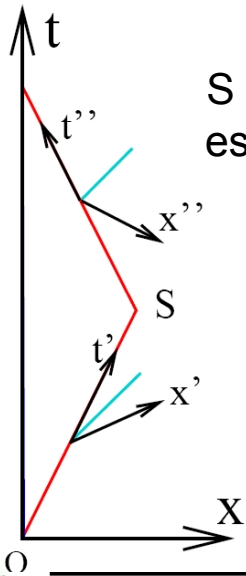
Válasz: a két út **NEM** egyenértékű:

a β iker nem volt végig egyetlen inerciarendszerben az S pontban gyorsult, „átugrott” egy visszafelé menő űrhajóba.

Ellenvetés: ezek szerint a gyorsulás fiatalít?

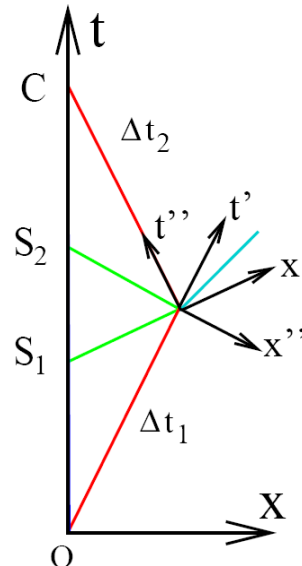
Válasz: **NEM** a gyorsulás, a **KR váltás!**

HÁROM KR szerepel az ábrán.



Keressük meg az S eseménnyel egyidejű eseményeket a Földön!

A KR-váltás megváltoztatja az egyidejűséget!



$$OS_1 < \Delta t_1 \quad \text{és} \quad S_2C < \Delta t_2$$

DE:

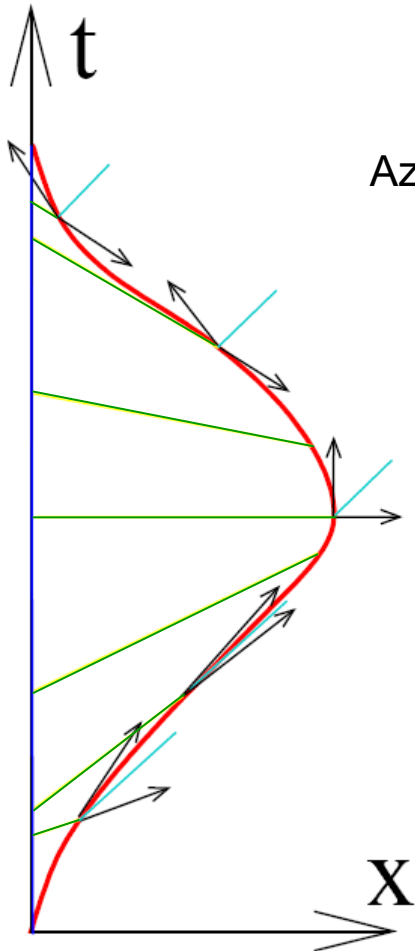
$$OS_1 + S_1S_2 + S_2C > \Delta t_1 + \Delta t_2$$

α iker

β iker



Folytonosan változó sebességű űrhajó:



Minden pontban van egy pillanatnyi, **lokális inerciarendszer**: ez folyamatosan változik. Időtengelye a világvonál érintője.

Az utazás adott pillanatával az utazó szerint egyidejű események ideje **nem egyenletesen söpri végig** a Föld világvonalát!
A visszaforduláskor gyorsan változik az egyidejűség.

Az ikerparadoxon geometriai interpretációja:

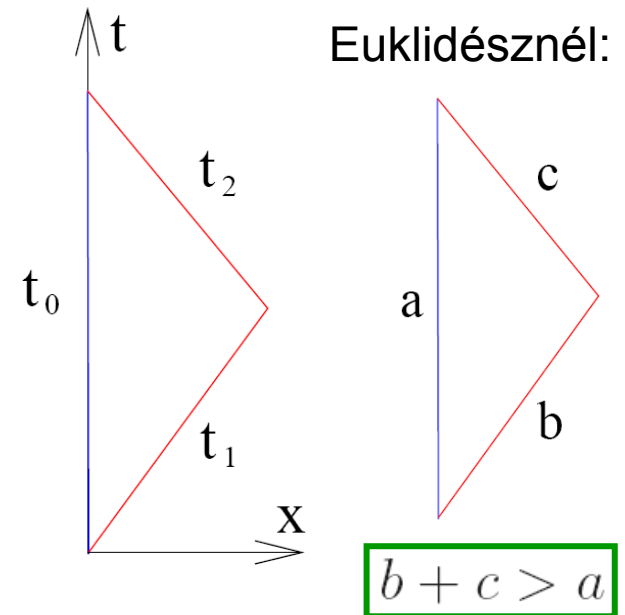
„Anti”-háromszög-egyenlőtlenség:

$$t_1 + t_2 < t_0$$

Ez a téridő-geometria sajátossága

Vigyázat!

Csak időszerű szakaszokra igaz!

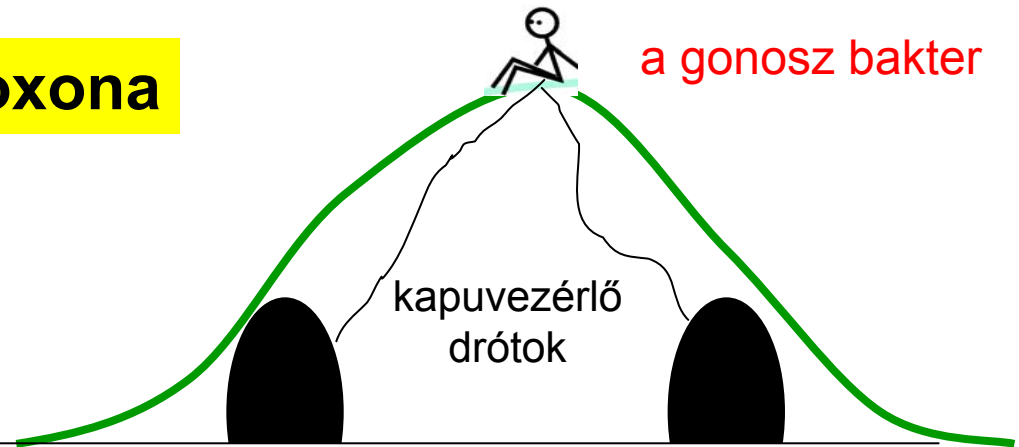


A „gonosz bakter” paradoxona

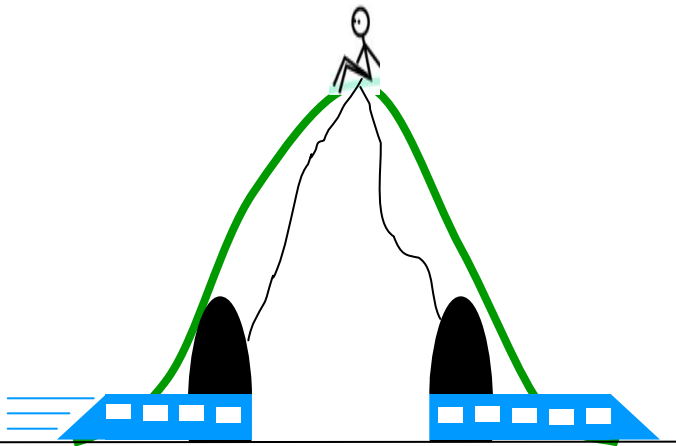
a gonosz bakter



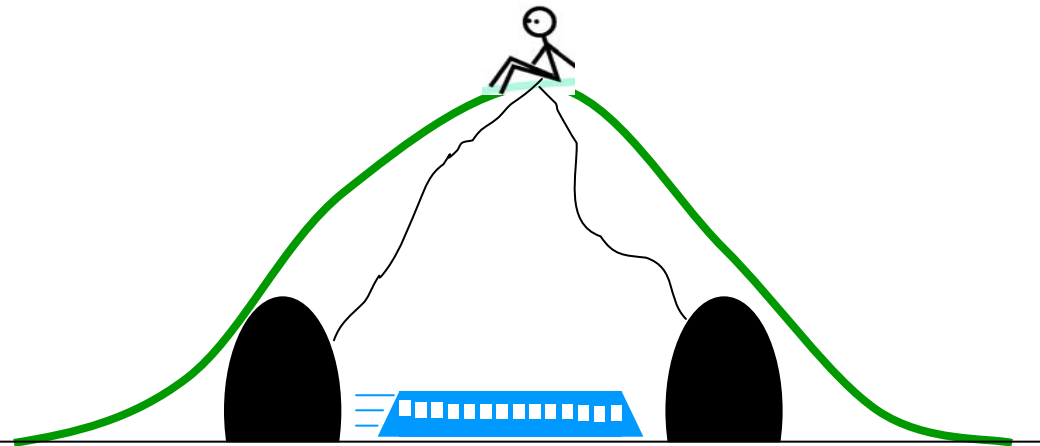
Einstein-expressz $V \sim c$
 $L = 1 \text{ km}$



alagút
 $L = 1 \text{ km}$



Így látja a mozdonyvezető



Így látja a gonosz bakter. **És akkor huss, becsukja mindkét kaput!**



A gonosz bakter paradoxona:

be van-e zárva a vonat, vagy nincs?
Ez már csak objektív állítás,
nem függhet attól, ki nézi...

Válasz:

de bizony függ!
Mert mit is jelent az, hogy „**akkor**”
becsukja mindkét kaput?

A távoli események egyidejűsége nem abszolút, függ attól, ki nézi!

Amikor a vonat hátsó vége is beér az alagútba, a bakter megnyomja a gombot, a **két kapu** egymástól távol bezáródik.

Ezek a bakter számára egyidejű események.

De a mozdonyvezető számára nem!

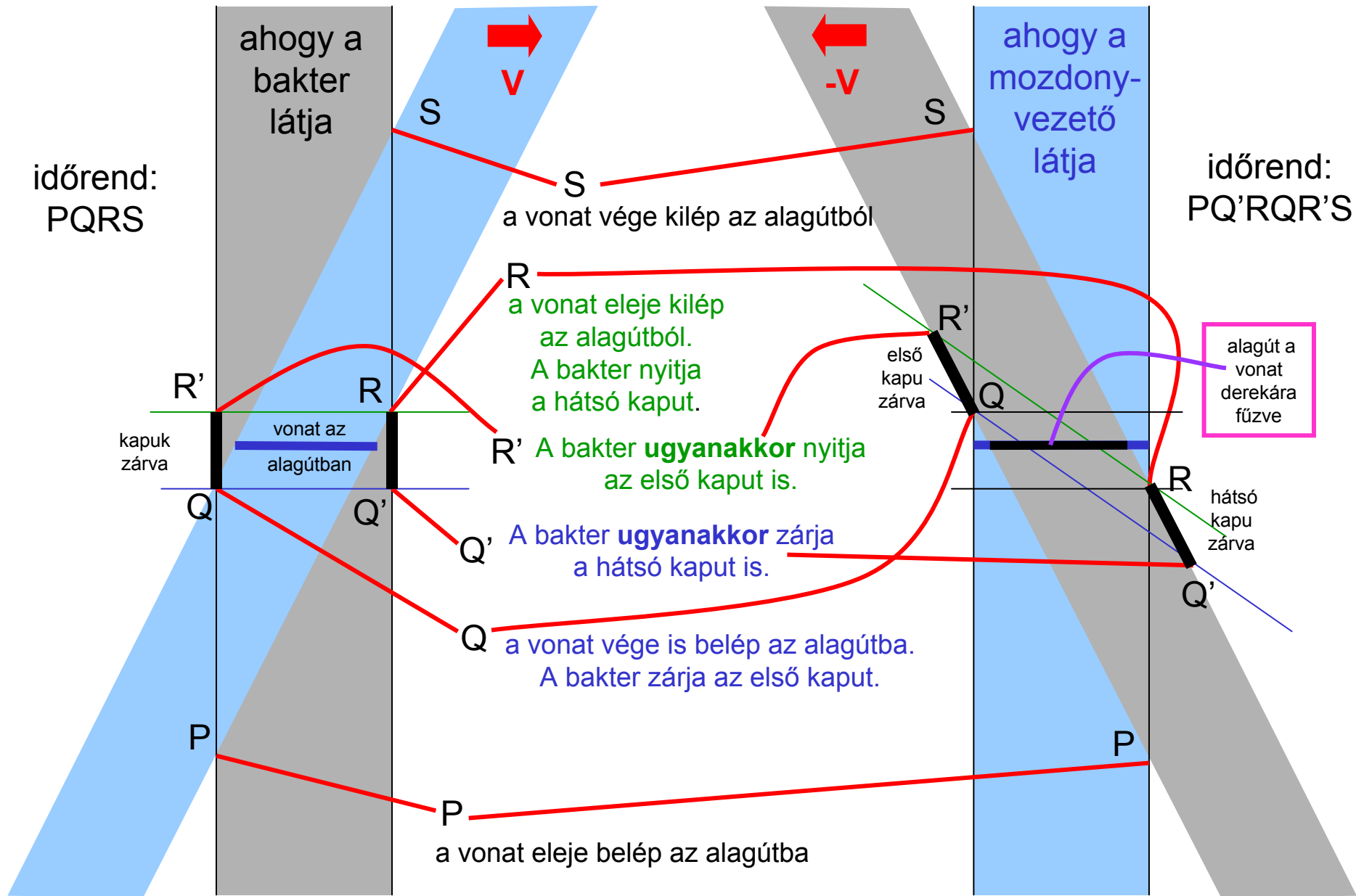
Módosítás: a nem teljesen gonosz bakter paradoxona.

Miután csapdába ejtette a vonatot, a bakter megszánja az utasokat.
Amikor a mozdony az alagút kijáratához ér, a bakter kinyitja mindkét kaput, és a vonat kisuhan az alagútból.

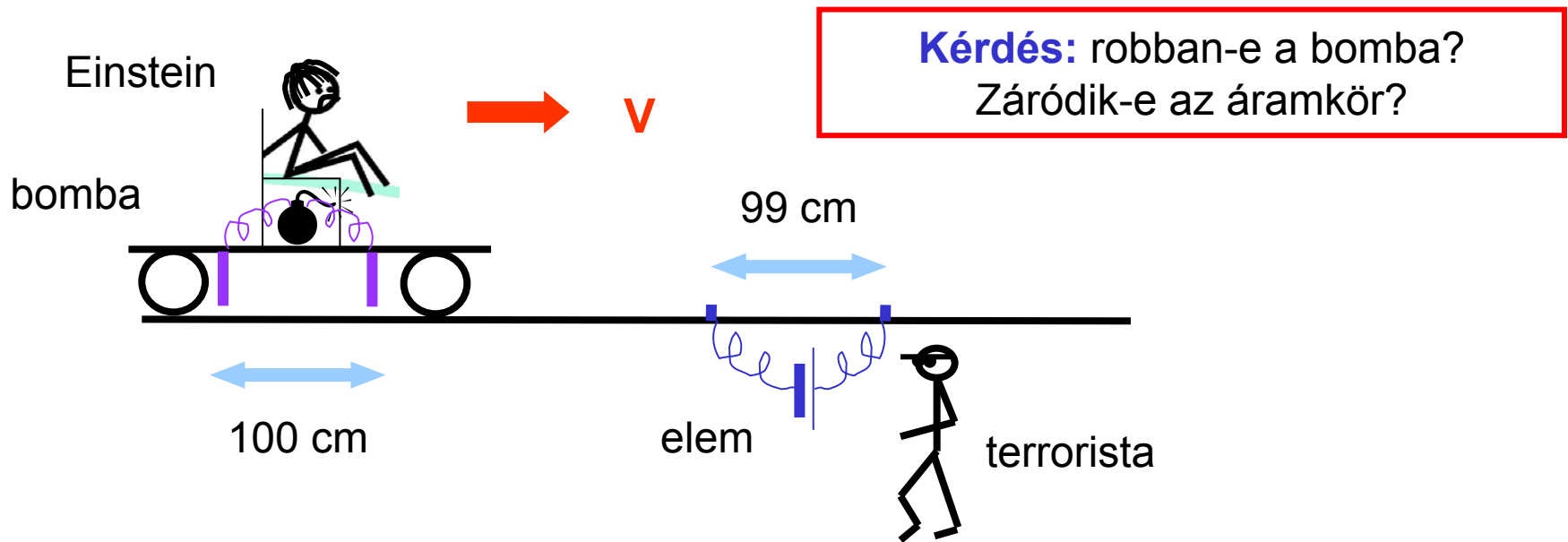
Paradoxon: a vonat egy ideig teljesen be volt zárva.
De a mozdonyvezető szerint a vonat be sem fér az alagútba!

Kövessük az események részleteit a tér-idő-diagramokon!





Einstein és a bomba paradoxona



A terrorista szerint: a vonat megrövidül 1 cm-t, az áramkör záródik:
BUMM !!!

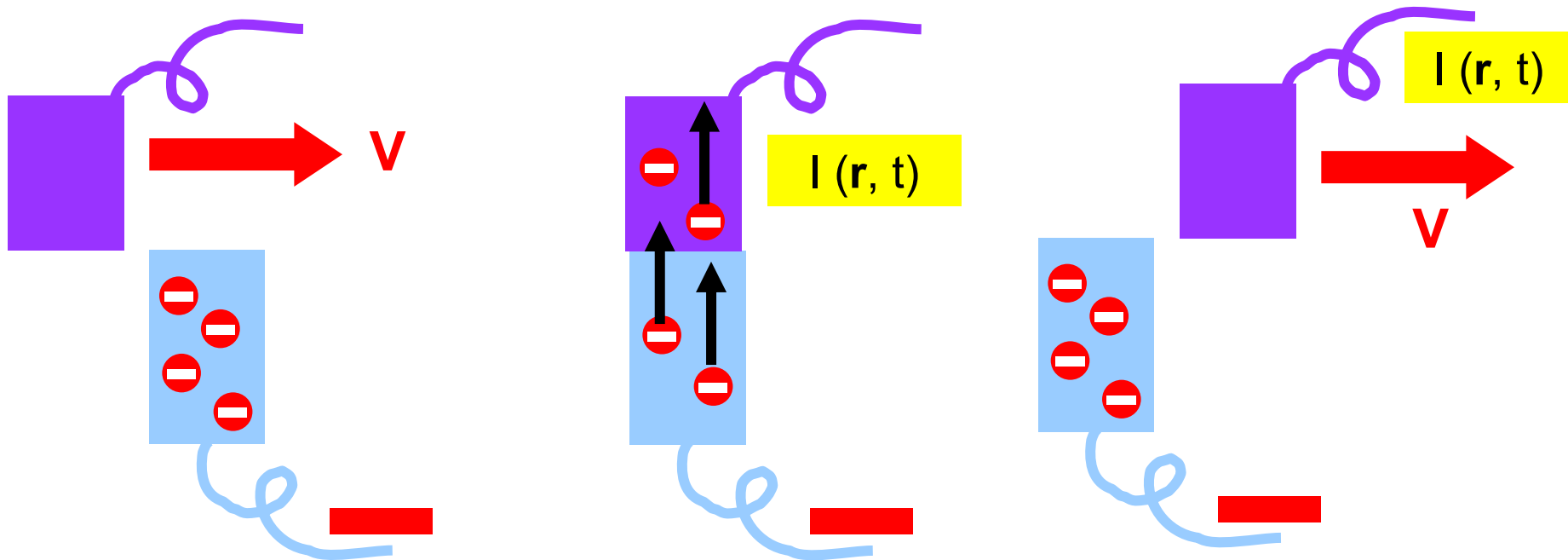
Az utas szerint: a sín megrövidül 1 cm-t, az áramkör NEM záródik:
nincs BUMM !!!

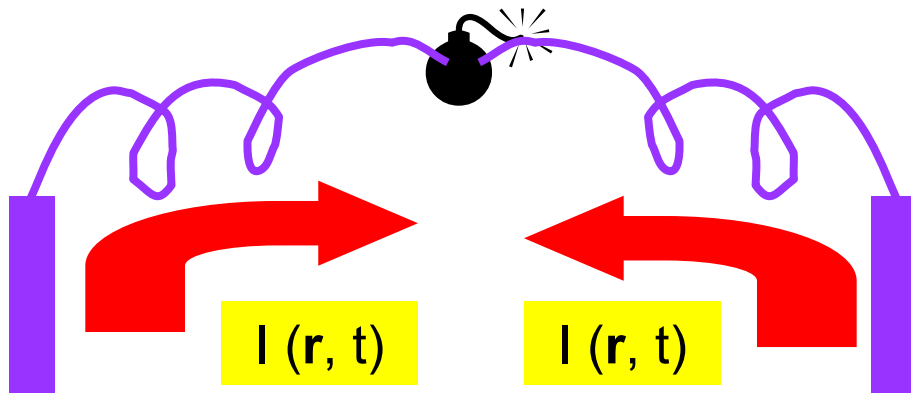
Paradoxon: a bomba robbanása egy helyen, egy időben lejátszódó esemény. Ez a relativitáselmélet szerint is objektív tény. Mégis másképp látja a két megfigyelő...

Megoldás: a két érintkezőpár érintkezése két TÁVOLI esemény,
az egyidejűségük nem abszolút, rendszerfüggő!

Az áramkör kiterjedt objektum.
NEM LÉTEZIK olyasmi, mint az
áramkörben adott t pillanatban folyó
 $I(t)$ áram!

Nem az egész áramkörben indul
meg az áram, hanem az
érintkezőknél egy **áramlökés**
keletkezik.





A bomba robbanása valóban objektív esemény, de az áramkör részletein, az áramlökések terjedésén és erősségén múlik.

Viszont **lényegtelen** az, hogy a két érintkezőben egyszerre indult-e az áramlökések.

Ezt másképp látja a két megfigyelő.

Az számít, hogy egyszerre érjen célba.

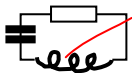
Ezt már egyformán látják!

Kérdés: miért beszélhetünk egyáltalán „**az áramkörben folyó áramról**” a térbeli részletek nélkül?

$$L \ll \lambda = c / v$$

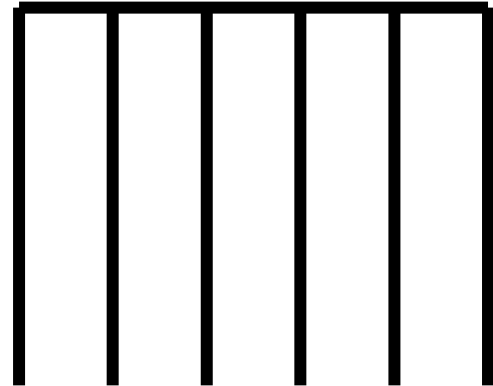
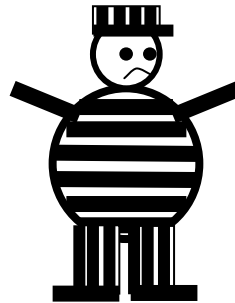
Mert a gyakorlatban előforduló áramkörök **kicsik** a megfelelő frekvenciájú sugárzás hullámhosszához képest.

Nagyfrekvenciás áramkörökben ez már nem teljesül!

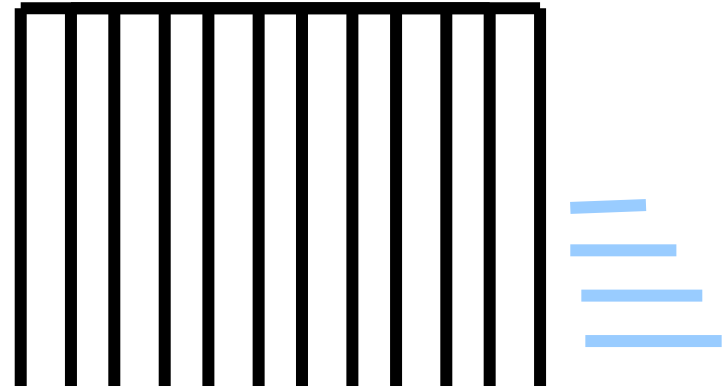


A kövér rab paradoxona

Javaslat: **fuss** a ráccsal párhuzamosan!



Ezt látja az őr a rács mellett



De ezt látja a futó rab...

Paradoxon: meg tud szökni a rab, vagy nem? Ki látja helyesen?



Köszönöm a figyelmet!

