Speciális relativitáselmélet

„Ami fontos, az abszolút.”

Vonatkoztatási rendszer

- A fizikai mennyiségek értéke, iránya majdnem mindig attól függ, hogy honnan nézzük, vagyis függenek a vonatkoztatási rendszertől.
- Ez anyagi test, amelyhez három egymásra merőleges tengelyt képzelünk illesztve (koordi-nátarendszer). A vonatkoztatási rendszerben határozzuk meg, hogy a testek az idő függvé-nyében hol tartózkodnak, hogyan mozognak.

A távolság mérése

- Két pont közötti távolságot (egy szakasz hosszát) beosztásokkal ellátott **merev** rúddal mérjük. (Jó kérdés: mi jelent az, hogy a rúd merev?)
- A távolság egysége: a Föld kerületének 40 milliomod része, ez 1 méter.
- Kérdés: hogyan mérjük meg egy mozgó szakasz hosszát álló mérőeszközzel?

Az idő mérése - 1

- Alapja: választunk egy mozgást, amelyet egyen-letesnek tekintünk, egyenletesnek posztulálunk, (ókorban a Nap mozgása az égen, a lepergő homok, az inga, az atomok rezgése). Ehhez viszonyítjuk más mozgások egyenletességét.
- Mi az időmérés eszközéül a Föld tengely körüli forgását választottuk.
- Egység (mi ezt választottuk): a Föld tengely körüli forgásának 24-szer 3600-ad része. Ez 1 másodperc.

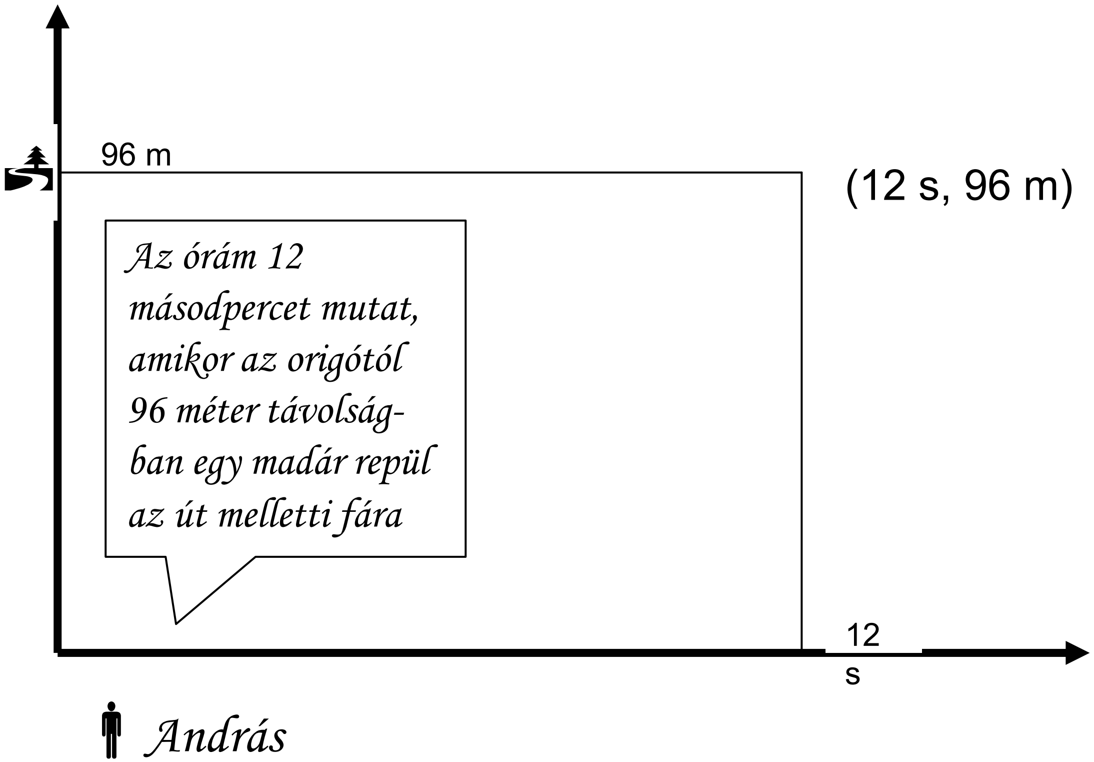
Az idő mérése - 2

- Tekinthetnénk az időmérés alapjának az elejtett kis-méretű testek mozgását? Igen, de a fizika törvényei nagyon bonyolultak lennének.
- A természettudományokban minden mérés vagy távolságmérés vagy számlálás. Az analóg idő-mérés is távolságmérés.
- Különböző vonatkoztatási rendszerekben külön-böző mozgást lehet az időmérés alapjának vá-lasztani.
- És egy adott vonatkoztatási rendszerben megoldható-e, hogy az órák együtt járjanak?

Az idő szinkronizálása

- Hogyan lehet elérni, hogy *egy vonatkoztatási rendszer különböző helyein az összes óra együtt járjon*? A tengerparti város ura eldönti, hogy a kikötőben *horgonyzó* hajókon pontosan akkor legyen dél, amikor a saját óráján. Hogyan lehet ezt megoldani?
- Hogyan lehet elérni, hogy a kikötőben *mozgó* hajók óráit a világítótorony órájához igazítani? Ez nagyon nehéz… Erről lesz szó.

Téridő - rendszeridő

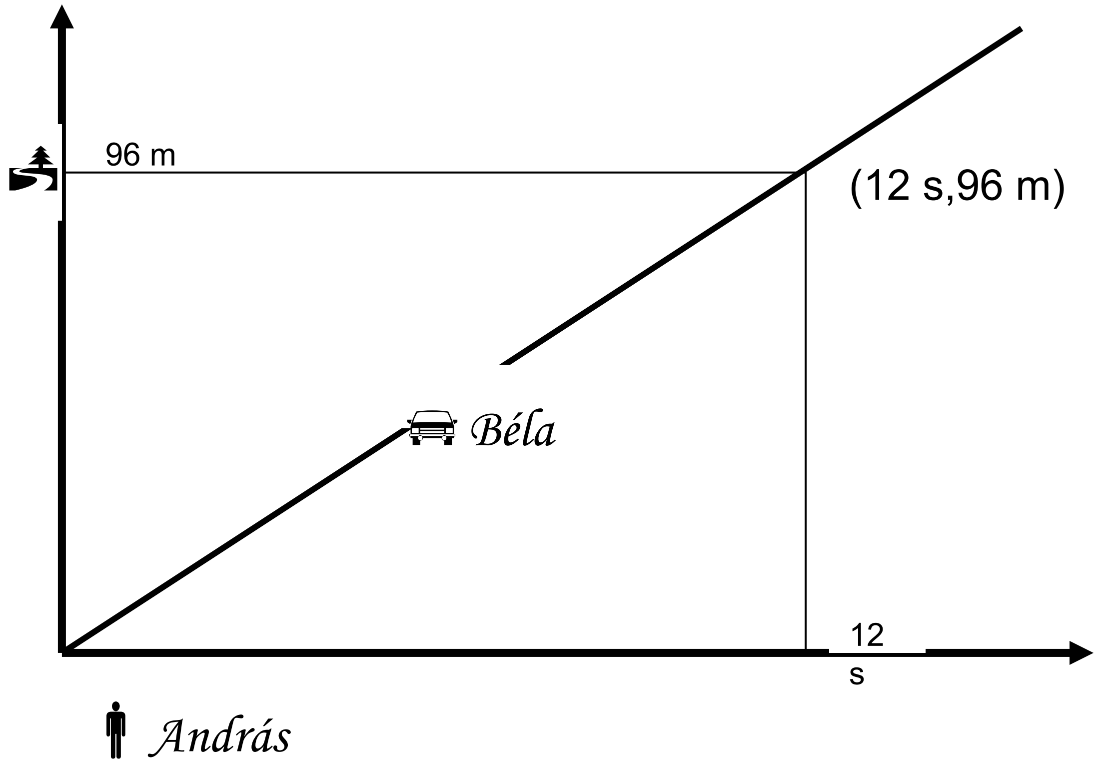


Új szereplő lép színre

- Egy autó a 0 s időpontban elhalad az origó mellett, sebessége 96 m/12 s = 8 m/s. Az autós éppen akkor halad el a fa mellett, amikor a madár leszáll a fára. Ez azt jelenti, hogy András az origóban azt tapasztalja, hogy az órája 12 másodpercet mutat, amikor az autó már 96 méter távolságra távolodott. Az autó grafikonja (világvonala) illeszkedik a (12 s, 96 m) pontra.

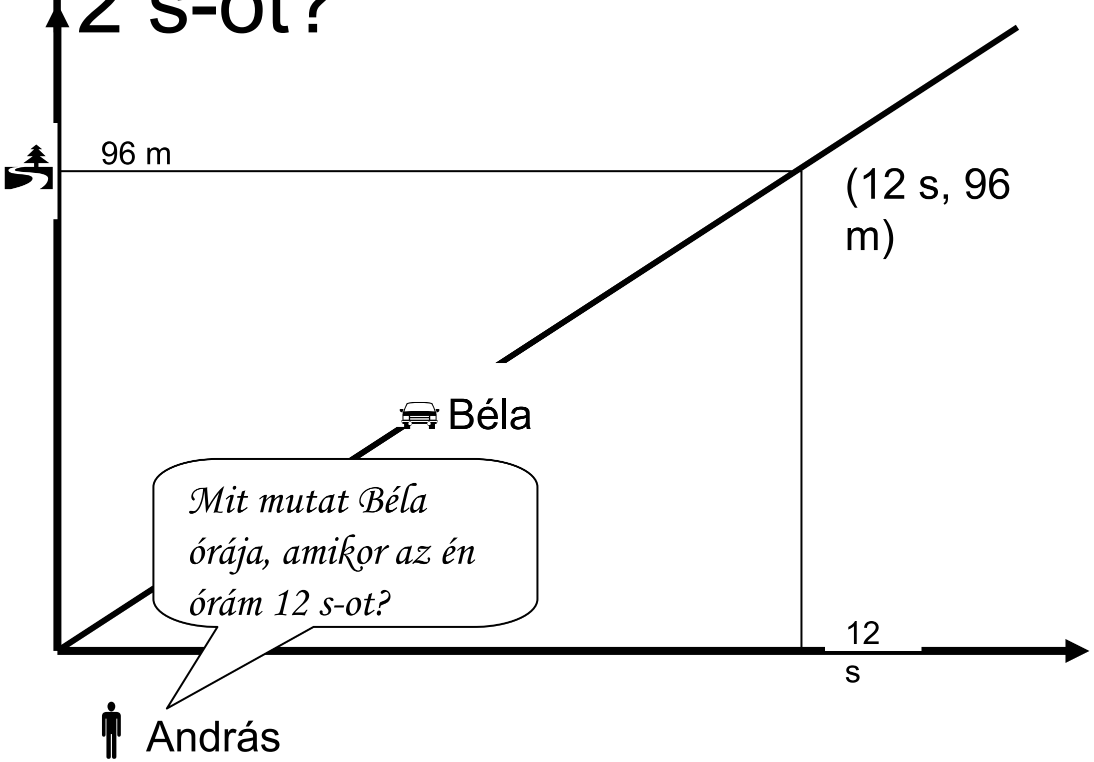
Az autó „világvonala”, grafikonja

- A világvonal áthalad a (12 s, 96 m) ponton

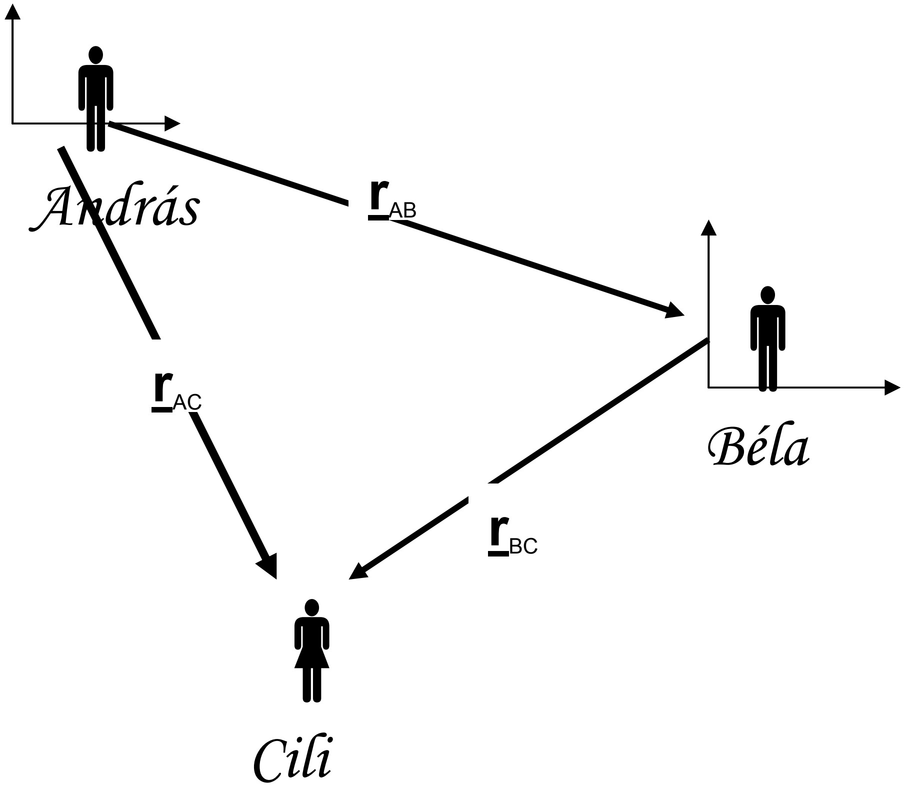


A nagy kérdés:

- „Mit mutat Béla órája, amikor az én órám 12 s-ot?”



Két fiú szemez egy lánnyal

- 

Sebességösszeadás

$$\mathbf{r}_{\mathbf{AB}} + \mathbf{r}_{\mathbf{BC}} = \mathbf{r}_{\mathbf{AC}}$$

$$\Delta\mathbf{r}_{\mathbf{AB}} + \Delta\mathbf{r}_{\mathbf{BC}} = \Delta\mathbf{r}_{\mathbf{AC}} \Big| :\Delta t$$

$$\frac{\Delta\mathbf{r}_{\mathbf{AB}}}{\Delta t} + \frac{\Delta\mathbf{r}_{\mathbf{BC}}}{\Delta t} = \frac{\Delta\mathbf{r}_{\mathbf{AC}}}{\Delta t}$$

$$\mathbf{v}_{\mathbf{AB}} + \mathbf{v}_{\mathbf{BC}} = \mathbf{v}_{\mathbf{AC}}$$

Mi volt a hallgatólagos feltevés?

$$\mathbf{r}_{\mathbf{AB}} + \mathbf{r}_{\mathbf{BC}} = \mathbf{r}_{\mathbf{AC}}$$

$$\Delta\mathbf{r}_{\mathbf{AB}} + \Delta\mathbf{r}_{\mathbf{BC}} = \Delta\mathbf{r}_{\mathbf{AC}}$$

$$\frac{\Delta\mathbf{r}_{\mathbf{AB}}}{\Delta t_{\mathbf{A}}} + \frac{\Delta\mathbf{r}_{\mathbf{BC}}}{\Delta t_{\mathbf{B}}} \stackrel{?}{=} \frac{\Delta\mathbf{r}_{\mathbf{AC}}}{\Delta t_{\mathbf{A}}}$$

$$?$$

$$\mathbf{v}_{\mathbf{AB}} + \mathbf{v}_{\mathbf{BC}} = \mathbf{v}_{\mathbf{AC}}$$

A sebesség összeadása

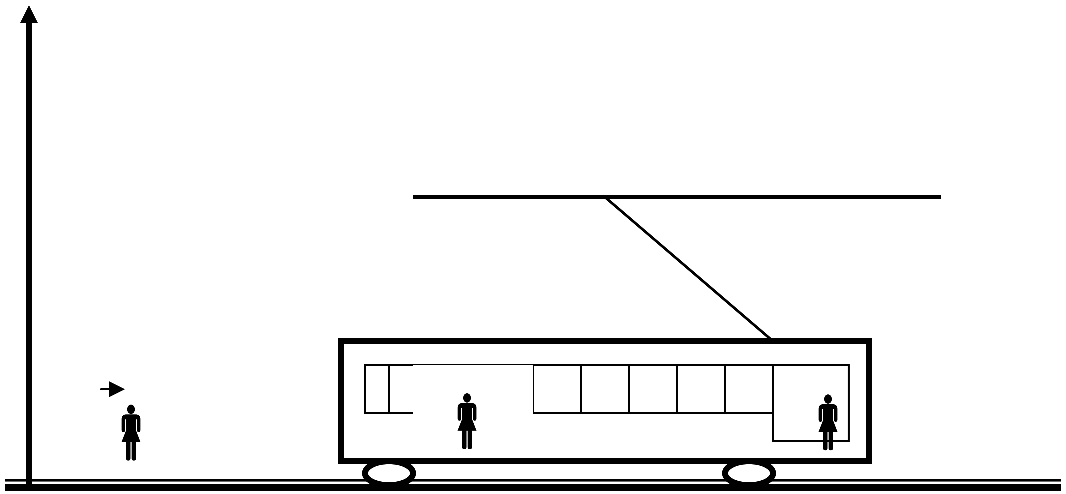
- A sebesség-összeadás szabálya akkor és csakis akkor érvényes, ha a világban egységes az idő. (Ez most még nyitott kérdés.)
- Az egységes idő feltételezése azt jelenti, hogy a világban minden óra együtt jár, tehát a szinkronizálás nem jelent problémát, és a sebességek összeadódnak.

Három feltétel

- A következő három feltétel ekvivalens:
  1. A sebesség „lineárisan” összeadódik
  2. Egységes idő az Univerzumban
  3. A mozgó órák együtt járnak az álló órákkal, (a kikötőben mozgó hajók órái is szinkronizálhatók a világítótoronyban járó órához).

Ha nem járnak együtt az órák

- Három szereplő: rendőr az úton, a villamos-vezető és az utas



Számoljunk…

- Tegyük fel, hogy a villamos hossza 12 m. Az utas végighalad a villamos végétől a villamos-vezetőig. Ez a villamosvezető órája szerint 3 s-ot vesz igénybe. Ugyanennek a időszaknak a hosszát a rendőr az út mellett 4 s hosszúnak találja. A rendőr azt is megállapítja, hogy a villamos közben elmozdul 8 m-t. Ekkor az utas 20 métert mozdul el (a rendőr szerint, és egyenlőre fogadjuk ezt el).

… a sebességösssszeadás nem teljesül.

- A villamos sebessége a rendőrhöz képest: 8/4 m/s, az utas sebessége a villamos-vezetőhöz képest 12/3 m/s, az utas sebessége a rendőrhöz képest 20/4 m/s.
- $\mathbf{V}_{RV}$=2 m/s, $\mathbf{V}_{VU}$=4 m/s, $\mathbf{V}_{RU}$=5 m/s
- $\mathbf{V}_{RV} + \mathbf{V}_{VU} \neq \mathbf{V}_{RU}$, (2 m/s + 4 m/s ≠ 5 m/s)

Most néhány szó a dinamikáról

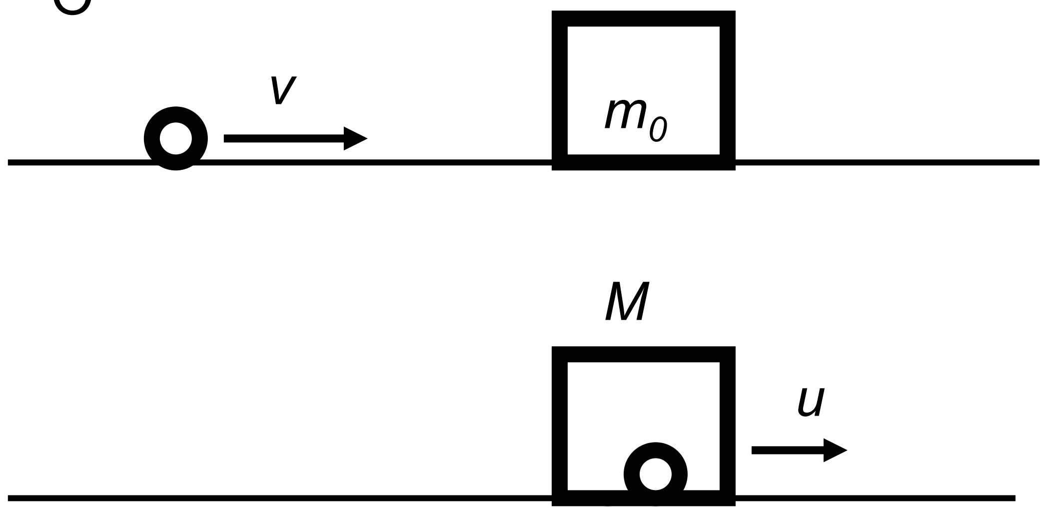
- Alapfogalmak: az anyag és a mozgás mennyisége (tömeg, impulzus). Jele: *m, I.*
- $I=mv$
- Alapelvek (axiómák)

  I. axióma: A kölcsönhatás nem változtatja meg az anyag mennyiségét (tömegmegmaradás törvénye, Empedoklész, Lomonoszov)

  II. axióma: A kölcsönhatás nem változtatja meg a mozgás mennyiségét (impulzusmegmaradás törvénye, Buridan, Galilei, Newton)

Hogyan mérjük a tömeget?

- Legyen m_0 az egység, reprodukálható test tömege. Kérdés: hányszor van meg m-ben m_0?



-

	Ütközés előtt	Ütközés után
Anyag mennyisége (skalár)	$m + m_0$	M
Mozgás mennyisége (vektor)	mv	Mu

Az alapelvek alkalmazása

- Első alapelv: $m + m_0 = M$
- Második alapelv: $mv = Mu$

- A két egyenletből:

$$\frac{m}{m_0} = \frac{u}{v - u}$$

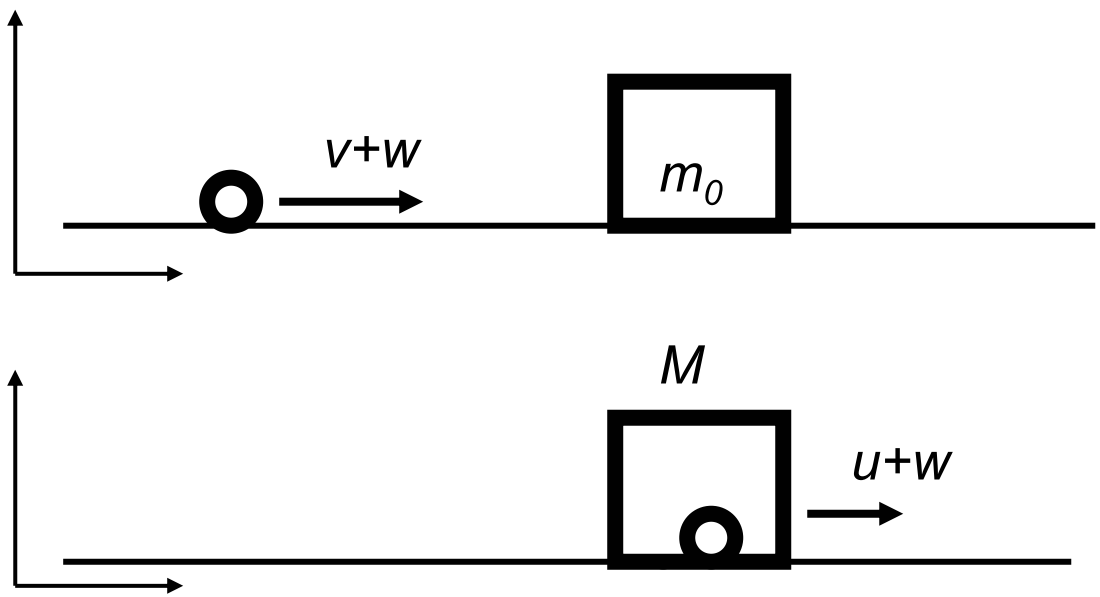
A tömeg mérése

- Az egyelőség jobb oldalán minden mennyiség mérhető méterrúddal és órával. A tömegmé-rést visszavezettük távolság- és időmérésre. Minden más mérés csak akkor fogadható el, ha nincs ellentmondásban a fenti méréssel.
- A tömeg egysége: 1 liter víz tömege, 1 kg.
- Impulzus: tömeg és sebességmérés alapján.

  Mértékegysége: kg m/s.

Függ-e a vonatkoztatási rendszertől?

- A talajhoz viszonyítva *w*-vel balra mozgó vonatkoztatási rendszerből nézve:



-

	Ütközés előtt	Ütközés után
Anyag mennyisége	$m + m_0$	M
Mozgás mennyisége	$m(v + w)$	$M(u + w)$

Rövid számolás

- Innen

$$m(v+w) = (m+m_0)(u+w)$$

$$\frac{m}{m_0} = \frac{u}{v-u}$$

Eredmény:

- A tömeg mérőszáma minden vonatkoztatási rendszerből nézve azonos, abszolút mennyiség.
- Fontos: a tömeg két alapvető tulajdonsága:

  (1) megmaradó (első alapelv)

  (2) abszolút mennyiség.

Inerciarendszer

- IR: olyan vonatkoztatási rendszer, a-melyben a magára hagyott testek moz-gásmennyisége állandó (állnak vagy egyenletesen mozognak). IR: amelyben érvényben van a tehetetlenség elve.
- Van-e ilyen? Empirikus kérdés. Elvben semmi sem támasztja alá.
- Az IR-ek egyenértékűek: Galilei relativitási elve

Newton I. törvénye

- **Newton I.törvénye egy megállapodás: a dinamika törvényeit inerciarendszerekhez viszonyítva írjuk le.**
- Newton I. törvénye nem törvény, hanem kiválasztási szabály (LANGE, Novobátczky). Hasonló a szerepe a KRESZ 1. §-hoz: rögzíti, hogy hol érvényes a többi.

Newton II. törvénye

- **IR-ben egy test impulzusának időegy-ségre eső megváltozása – *ma* – egyen-lő a környezettől időegység alatt kapott impulzussal, amelyet a testre ható erő-nek nevezünk (*F*).**

$$\frac{m \cdot \Delta v}{\Delta t} = m \cdot a = F$$

Newton III. törvénye

- **Az impulzusmegmaradás törvénye: inerciarendszerben zárt rendszer ösz-szes impulzusa állandó. Másként: az erőhatások párossával lépnek fel: ha az A testre a B test erőt fejt ki, akkor a B test az A testre azonos nagyságú, ellen-tétes irányú erőt fejt ki.**

Mi a fény?

- Elektromágneses hullám: az elektromos és mágneses terek egymást gerjesztő, egymásra merőleges, a térben tovaterjedő örvényei.

$$\sum_{O} \mathbf{Eds} = -\dot{\Phi}$$

$$\sum_{O} \mathbf{Bds} = \frac{1}{c^2}\dot{\Psi}$$

Hullámegyenlet

- A két törvényből hullámegyenlet származik. Ebből kiolvasható a terjedés sebessége:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}$$

Honnan nézve 3000000 km/s?

- Talán a fényforráshoz viszonyítva *c* a fény sebessége?

  Megfigyelés: páros csillagok…
- Talán az észlelőhöz képest? Létezik-e ÉTER? (Michelson és Morley kísérletei)

  Nem létezik éter, nincs abszolút tér.

A fény sebessége állandó

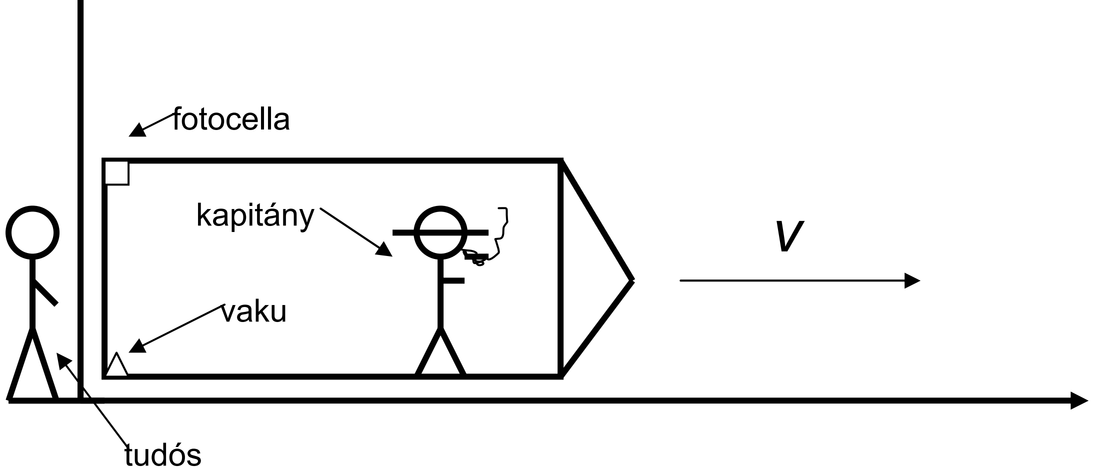
- A Maxwell-egyenletekből következik, hogy a fény terjedési sebessége minden tehetetlenségi vonatkoztatási rendszerben (IR) azonos. Nem függ sem a fényforrás sebességétől, sem az észlelő sebességétől.

Fény az űrhajón

- Ha egy hosszú űrhajó 200 ezer km/s sebességgel halad (hozzánk képest), és a far-részéből egy fénysugarat bocsátanak ki az orr-rész felé, akkor ennek a sebességét 300 ezer km/s-nak mérem, és nem 500 ezer km/s-nak.
- Ez azt jelenti, hogy az idő nem abszolút, és a mozgó órák nem járnak együtt az álló órákkal: $v_{oü} + v_{üf} \neq v_{of}$

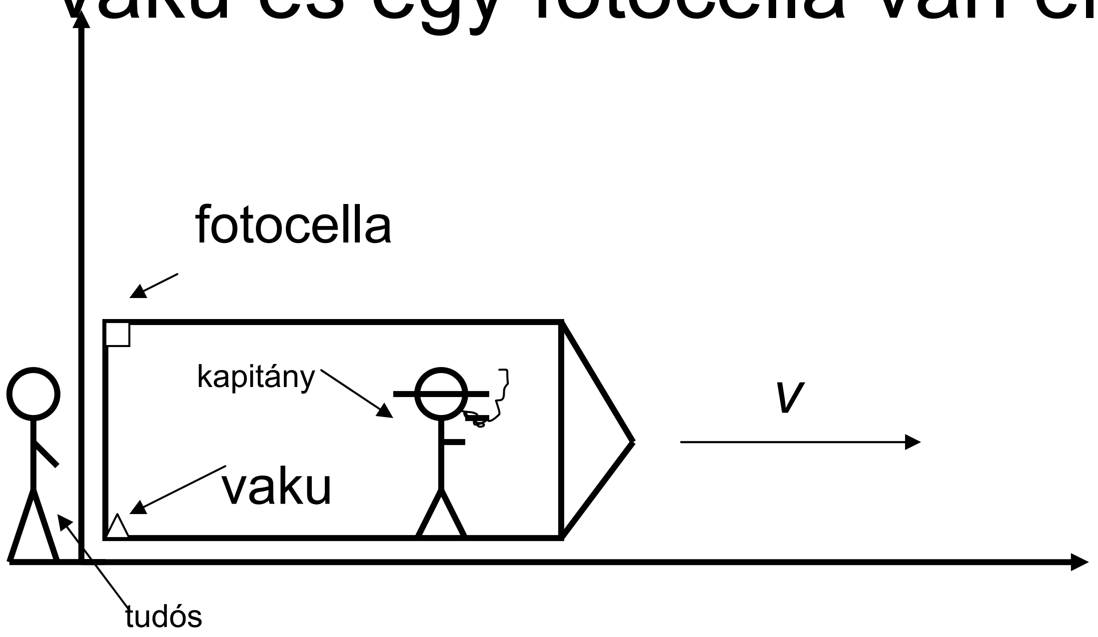
Alaphelyzet

- Az űrhajó (a kapitánnyal a fedélzetén) *v* sebességgel elhalad a tudós szobája mellett, pontosan amikor a kapitány és a tudós órája egyszerre 0-t mutat.



Technikai eszközök az űrhajón

- Az űrhajón a mozgás irányára merőlegesen egymással szemben egy vaku és egy fotocella van elhelyezve.



Kétféle idő

- A fény felvillanása és a fotocella jelzése közötti időt a tudós *t*-nek, az űrhajón utazó kapitány τ-nak méri. Az űrhajó a vonatkoztatási rendszerben megtesz *vt* utat. A fény a vonatkoztatási rendszerben *ct* utat, az űrhajóból nézve $c\tau$ utat tett meg.
- A fény az űrhajóban mérve és a tudós koordinátarendszeréből nézve is *c*-vel halad. *(Ez a nehéz pont: ellentétes szemléletünkkel.)*

A speciális relativitáselmélet axiómái

- Két axióma:

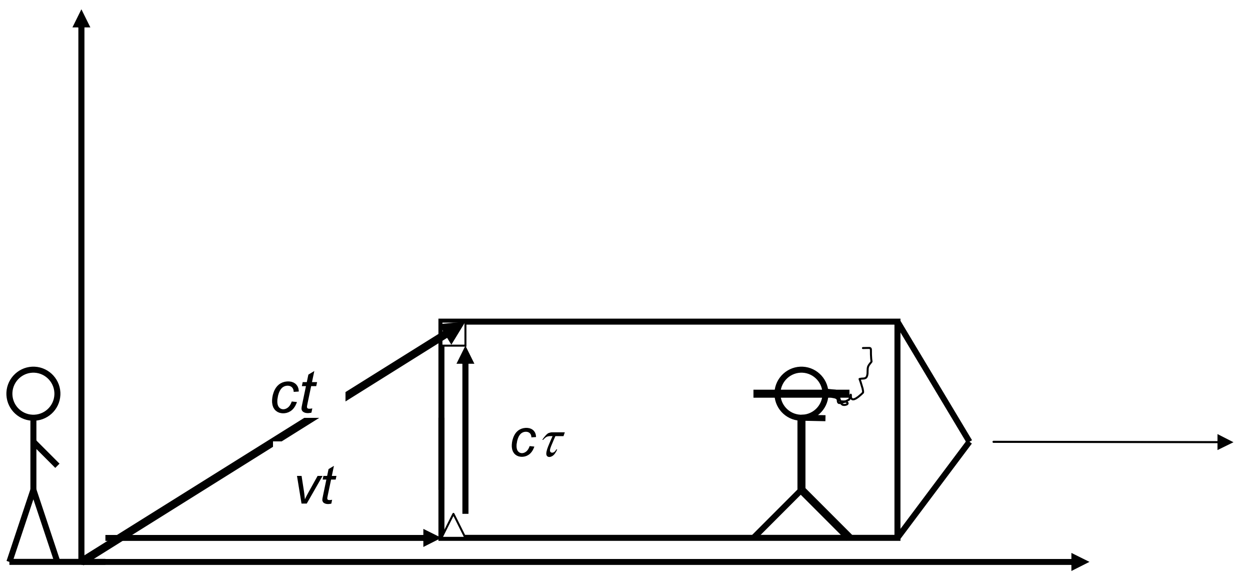
  1. Az inerciarendszerek egyenenértékűek

  2. A fény sebessége minden inerciarend-szerben (vákumban) azonos.

Az első axiómával kapcsolatban nincs szemléleti problémánk. A másodikkal kapcsolatban nem tehetjük fel azt a kérdést, hogy érthető-e? Ez az állítás nem érthetetlen és nem érthető: ez tény, bár el kell ismerni, hogy a szemlélettel ellentétes. El kell azonban fogadni, mert a Maxwell-törvények kényszerítő erővel hatnak.

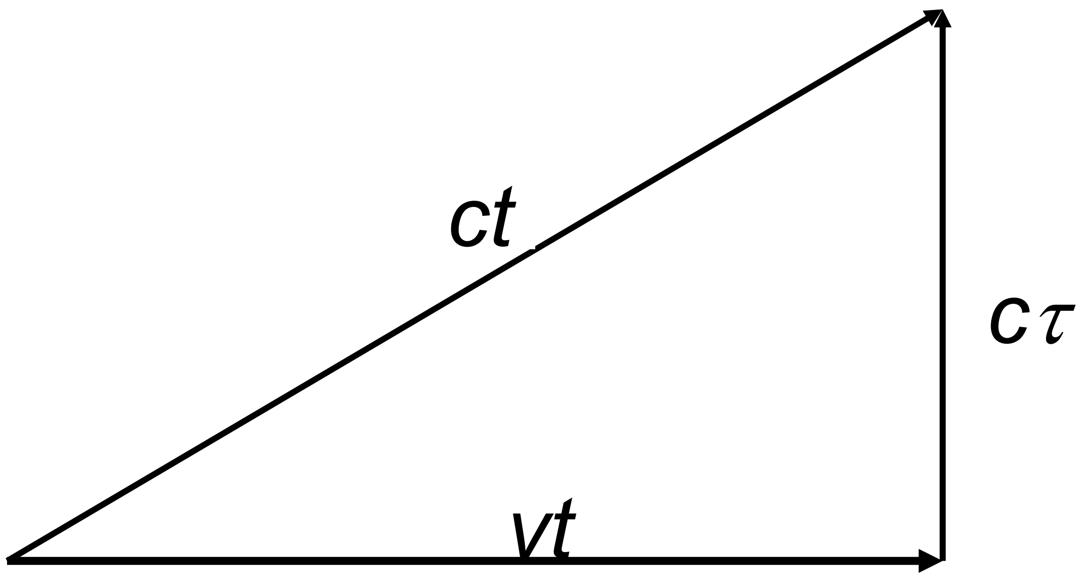
A lényeg…

- Mindez itt látszik.



Ez a legfontosabb!

- Emeljük ki a háromszöget!



Írjuk fel a Pithagorász-tételt

-

$$(ct)^2 = (vt)^2 + (c\tau)^2$$

$$\left(c^2 - v^2\right)t^2 = c^2\tau^2$$

$$(1 - \frac{v^2}{c^2}) \cdot t^2 = \tau^2$$

Végül…

- A tudós vonatkoztatási rendszerében mért *t* „rendszeridő” és az űrhajó τ „sajátideje” közötti kapcsolat:

$$t = \frac{\tau}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Egy példa számokkal

- Ha az űrhajó sebessége 240000 km/s, vagyis 0,8*c*. Tegyük fel, hogy t=1s. Ekkor τ=0,6 s.
- Két esemény (a vaku villanása és a foto-cella jelzése) között eltelt idő az űrhajóból nézve rövidebb, mint a tudós rendszer-ideje:
- **Sajátidő ≤ rendszeridő**

Fényév

- Mérjük az időt évben, a távolságot fény-évben. 1 fényév az a távolság, amelyet a fény (vákuumban) 1 év alatt megtesz. Ekkor a fény sebessége:

$$c = 1 \frac{\text{fényév}}{\text{év}}$$

Fényméter

- Az idő új egysége: az az idő, amely alatt a fény vákumban 1 méter utat megtesz. A fény sebessége:

$$c = 1\frac{\text{méter}}{\text{fényméter}}$$

Fontos észrevétel

- A fénysebességnél nagyobb sebesség nem lehetséges: egyetlen anyagi test sem mozoghat gyorsabban, mint a fény.
- Célszerű a sebességet a fénysebesség arányában kifejezni (az űrhajó sebessége $\beta=0{,}8$). Ekkor a fény sebessége 1. Ugyanezt kapjuk, az időt és a távolságot ugyanabban az egységben mérjük, pl.: méter, fényméter.

Fontos lesz a következő:

- Elemezzük a

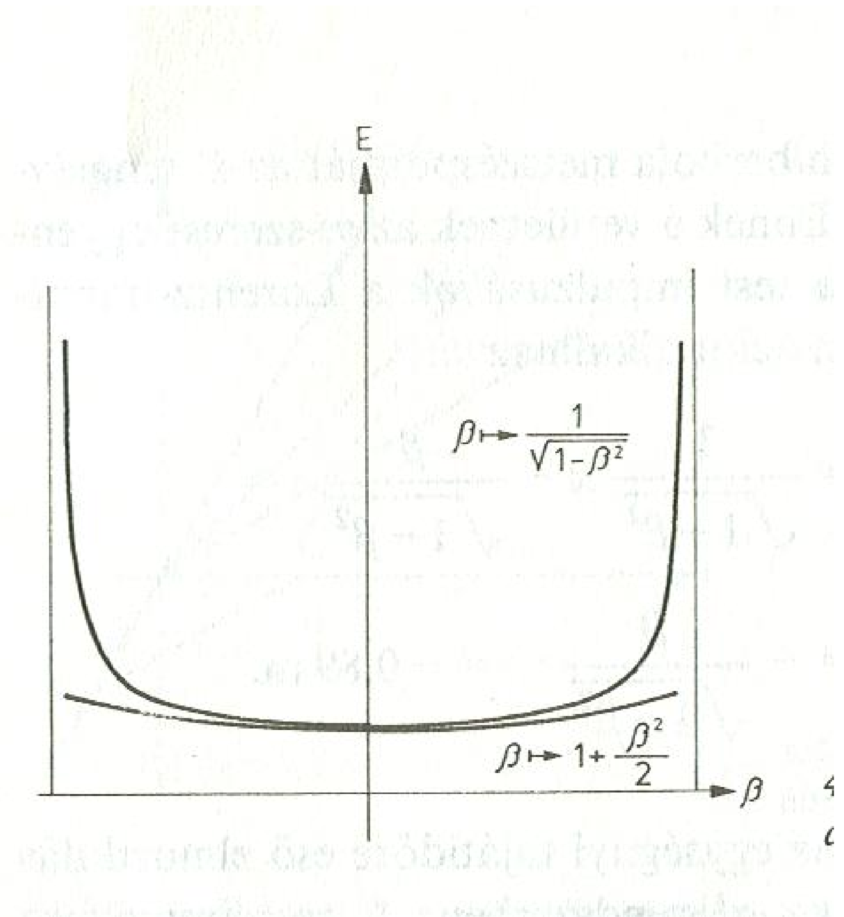
$$t = \frac{\tau}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{\tau}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

összefüggést.

Kiszámolható, hogy közelítőleg:

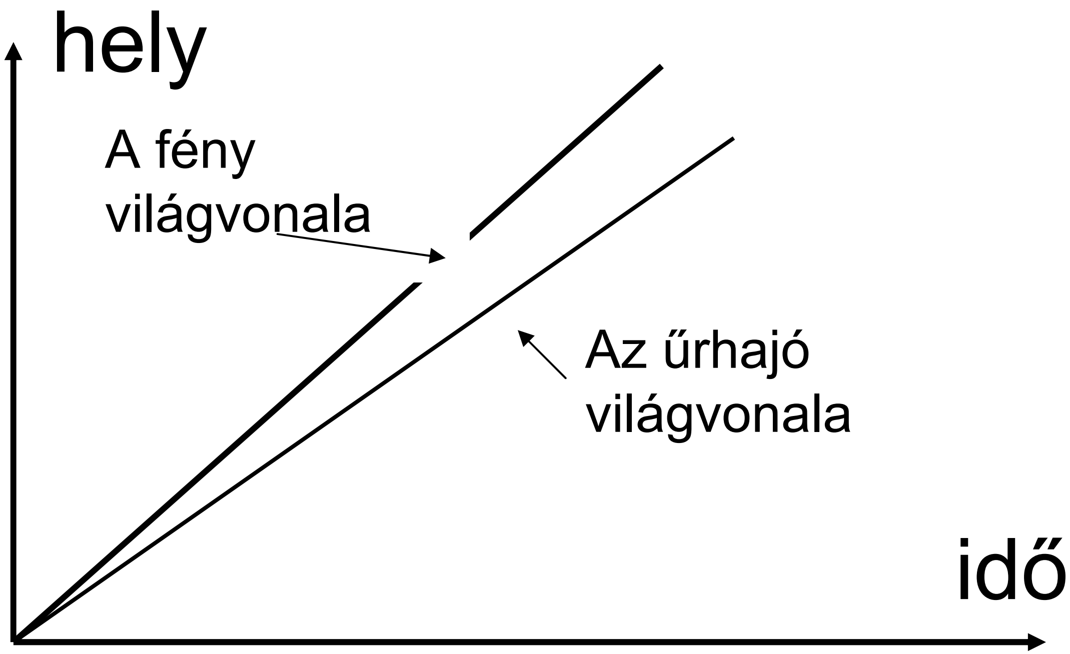
$$\frac{t}{\tau} = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \approx 1 + \frac{1}{2}\beta^2$$

A két függvény

- 

Tér-idő

- A fény világvonala 45^o-os egyenes. Más grafikonok meredeksége kisebb.



Példa

- Az űrhajó szélessége 6 méter, sebessége 0,8 méter/fényméter. Ekkor a fény emisz-szziója és elnyelődése között– az űrhajóból nézve, a kapitány óráján τ= 6 fény-méter idő telik el. E két esemény között a rend-szer origójában tartózkodó tudós t=10 fényméter időszakot mér. Közben az űr-hajó x=8 méter utat tett meg.

Összefüggés *t*, *x*, τ között

- A Pithagorász-tétel alapján (c =1)

$$x^2 + \tau^2 = t^2$$

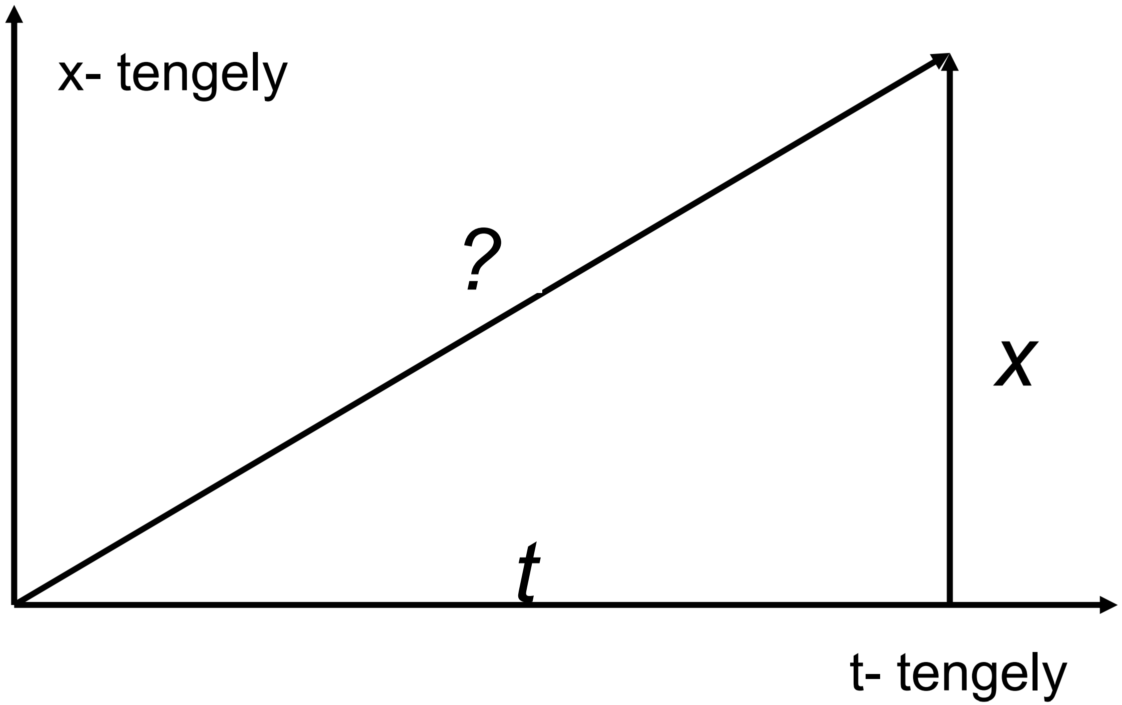
$$8^2 + 6^2 = 10^2$$

$$t^2 - x^2 = \tau^2$$

Ábrázoljuk tér-idő síkon

- A hely és időkoordinátákat egyaránt méterben mérjük. (Mérhetnénk mindkettőt évben, fény-évben.) Az x-t síkon a fény felvillanásának koordinátái: (0, 0), a fotocella a elnyeli a fényt, ennek az eseménynek a koordinátái: (10,8). Mindkét pont illeszkedik az űrhajó világvonalára.
- Milyen jelentést tulajdoníthatunk a (0,0) és a (10,8) pontokat összekötő szakasz hosszá-nak?

Mekkora az átfogó?



$t^2 + x^2 = ?$

Ismerjük a jó választ…(honnan is?)

- Emeljük négyzetre a két koordinátát (a rend-szerben mért időt és távolságot)! Kivonjuk (nem összeadjuk, mint az igazi Pithagorász-tételben!) t^2 -ből x^2-et,

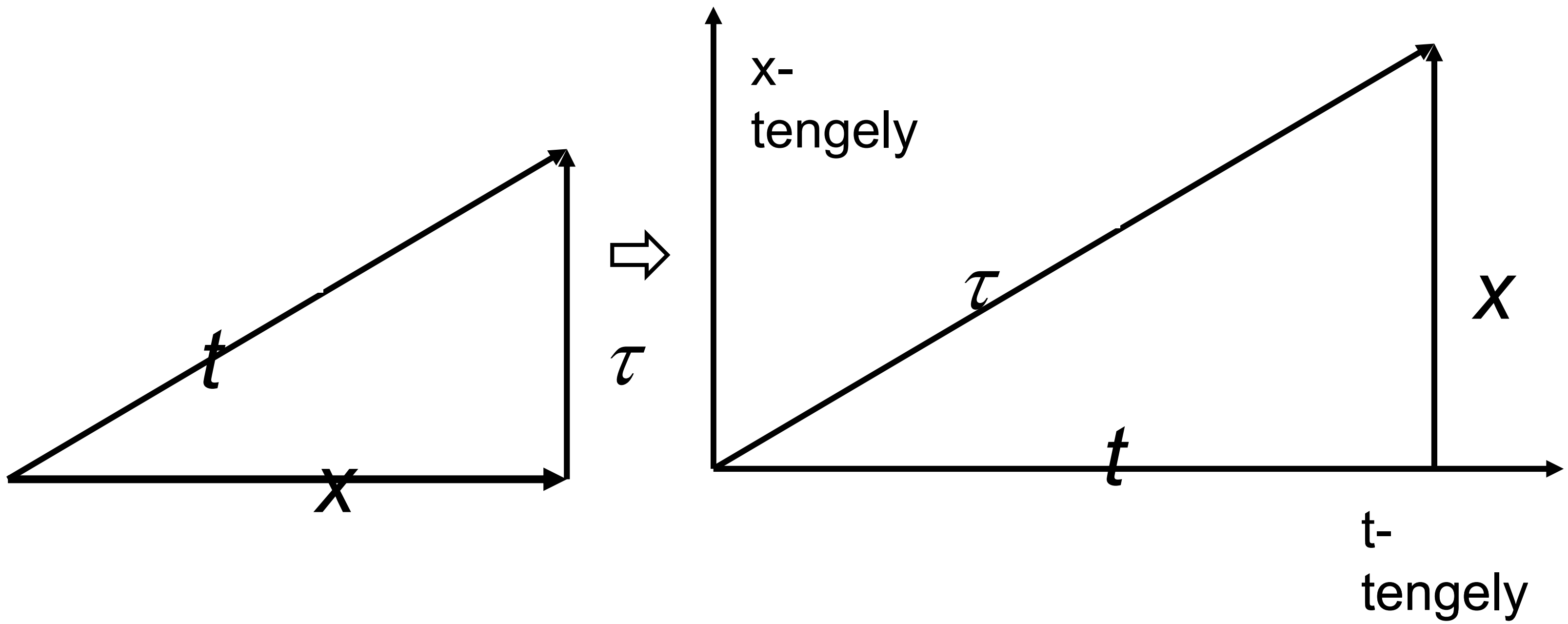
$$t^2 - x^2 = \tau^2$$

A háromszög átfogója a sajátidő!

Megjegyzés: $t^2 + (\sqrt{-1} \cdot x)^2 = \tau^2$

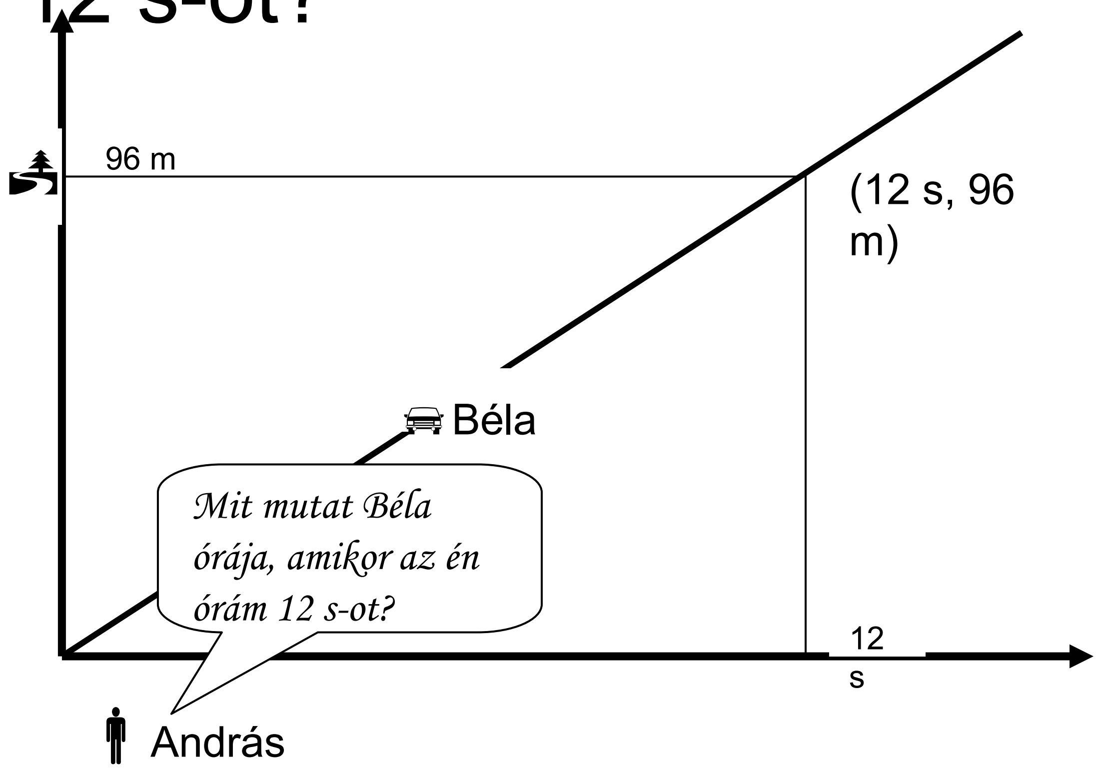
Figyelem!

- Két háromszög szerepel:



Ez volt a nagy kérdés:

- „Mit mutat Béla órája, amikor az én órám 12 s-ot?”



Régi kérdésre a válasz…

- *t*=12 s = 3,6· l09 fényméter, x= 96 méter

$$t^2 - x^2 = (3{,}6 \cdot \mathrm{l}0^9)^2 - 96^2 \quad \approx (3{,}6 \cdot \mathrm{l}0^9)^2$$

Túlságosan kicsi a sebesség, ezért nincs érzékelhető különbség a rendszeridő és a sajátidő között.

Ha nagy a sebesség:

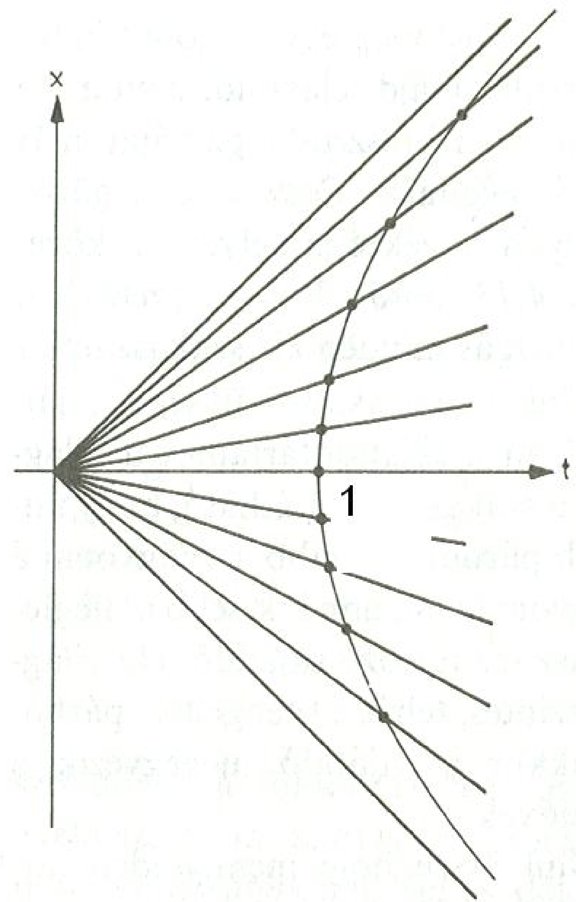
- Ha azonban nagy a sebesség: 0,8 méter/fényméter, a rendszer origójában tartózkodó tudós t=10 fényméter időszakot mér, a kapitány órája τ= 6 fényméter időt mutat.

A fény sajátideje nulla

- A fény elindul a Napról, 8 perc alatt a Földre ér. A sajátideje nulla, igazán tiszavirág életű!

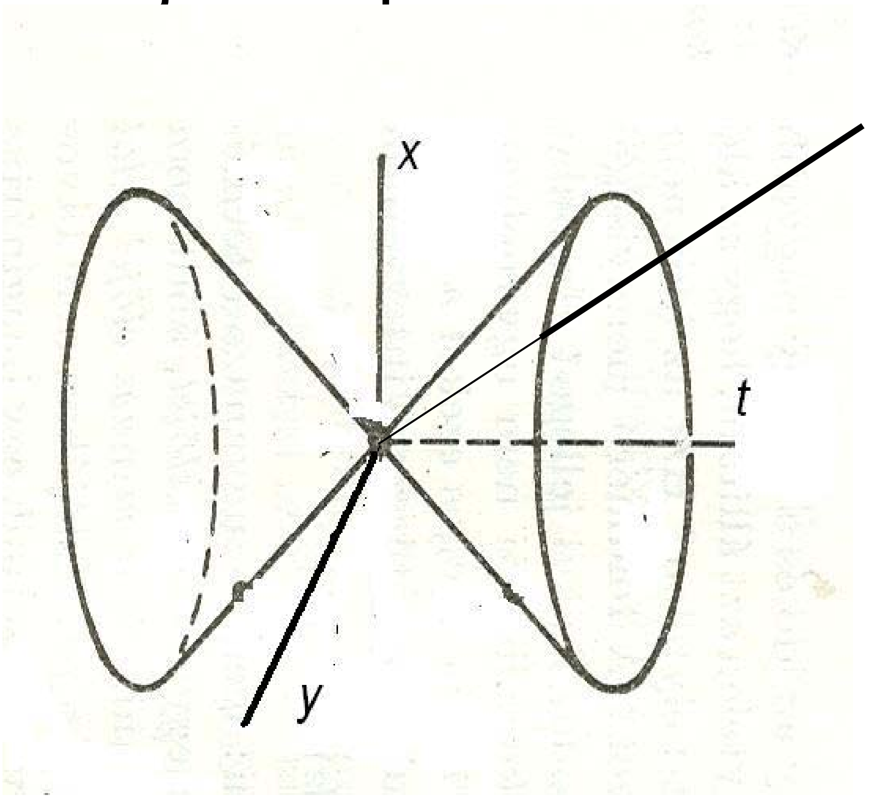
$$t\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}=\tau=0$$

Azonos sajátidők

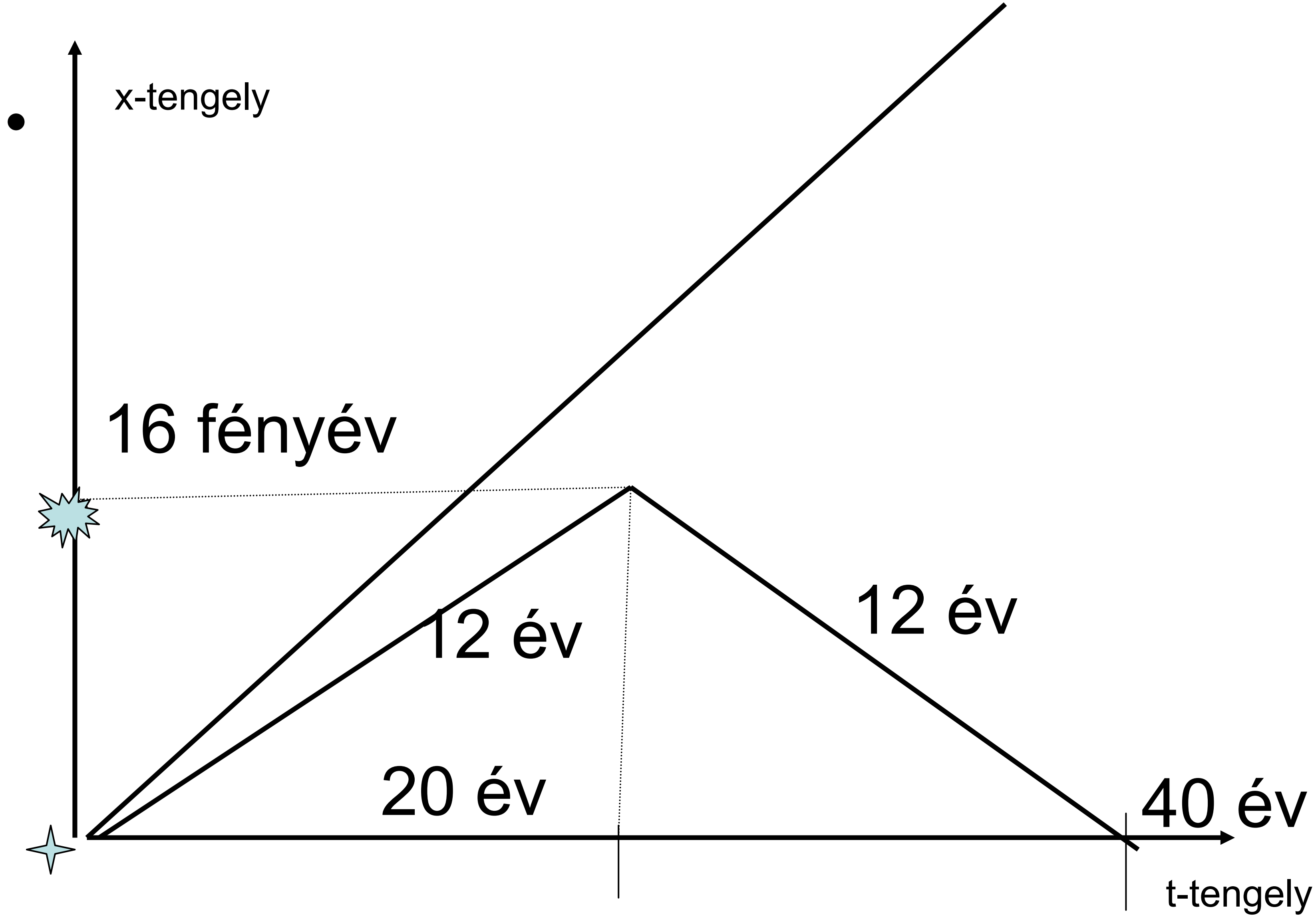
- 

Fénykúp

- Az origón keresztülhaladó mozgások grafikonja a kúpban halad.



Ikrek



A történet

- Két testvér (ikrek) közül az egyik űrhajóra száll, hogy megnézze a 16 fényévre található kis csillagot. A testvére itthon marad. Az űrhajó sebessége 0,8 fényév/év. Az itthon maradt testvér megállapítja, hogy az űrhajó 20 évig távolodik, majd 20 évig közeledik. Tehát 40 évvel öregebb, amikor a testvére hazaért. Az űrhajóban utazó testvér saját óráján regisztrálja, hogy 12 évig távolodik, majd 12 évig közeledik. Tehát 24 évvel lett öregebb. A testvére 40 évvel.

Sebességösszeadás

- Ezt most levezetés nélkül. A számításoknak könnyen utánanézhetünk.

$$\frac{v_{AB}+v_{BC}}{1+\frac{v_{AB}\cdot v_{BC}}{c^2}}=v_{AC}$$

Távolságmérés

- Az A rendszerrel mozgó rúd elhalad az „O” rendszer origójában tartózkodó megfigyelő mellett. Két esemény: a rúd eleje elhalad, a rúd vége elhalad. Az „O”-ban τ időt mérnek, „A”-ban t-t. „O”: az L hosszúságú rúd τ idő alatt halad el O mellett, „A”: az „O” rendszer origója t idő alatt halad el az L_0 hosszú rúd mellett.

Lorentz-kontrakció

$$\beta = \frac{L_0}{t} = \frac{L}{\tau}$$

$$L_0\sqrt{1-\beta^2} = L_0\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} = L$$

(Ezért volt indokolt kérdés, hogy mit jelent az, hogy merev rúddal mérjük a távolságot.)

Tömegmérés

- Térjünk vissza a tömeg mérésére. A tömeget úgy mérjük, ahogyan már megbeszéltük (25. és 26. dia). A következő kérdés az volt, hogy függ-e a tömeg attól, hogy melyik inerciarendszerben mérjük. Akkor azt, kaptuk, hogy a tömeg nem függ az IR választástól, de „felhasználtuk”, hogy a sebesség lineárisan összeadódik.

Mit értsünk impulzuson?

- Követelmény: ha egy nagy sebességű test ütközik egy kis sebességű testtel, akkor az impulzusváltozások egyenlők legyenek, és ellentétes irányúak. Ebből a feltételből azt kapjuk, hogy a

  relativisztikus impulzus = tömeg x egységnyi sajátidőre jutó elmozdulás:

$$I = m\frac{\Delta r}{\Delta \tau}$$

Másként:

Kis átalakítással:

$$I = m\frac{\Delta r}{\Delta \tau} = m\frac{\Delta r}{\Delta t}\cdot\frac{\Delta t}{\Delta \tau} = m\frac{\Delta t}{\Delta \tau}\frac{\Delta r}{\Delta t} = m_* v$$

Olvassuk össze a három tényező közül az első kettőt (nagy trükk): ezt nevezzük relativisztikus tömegnek.

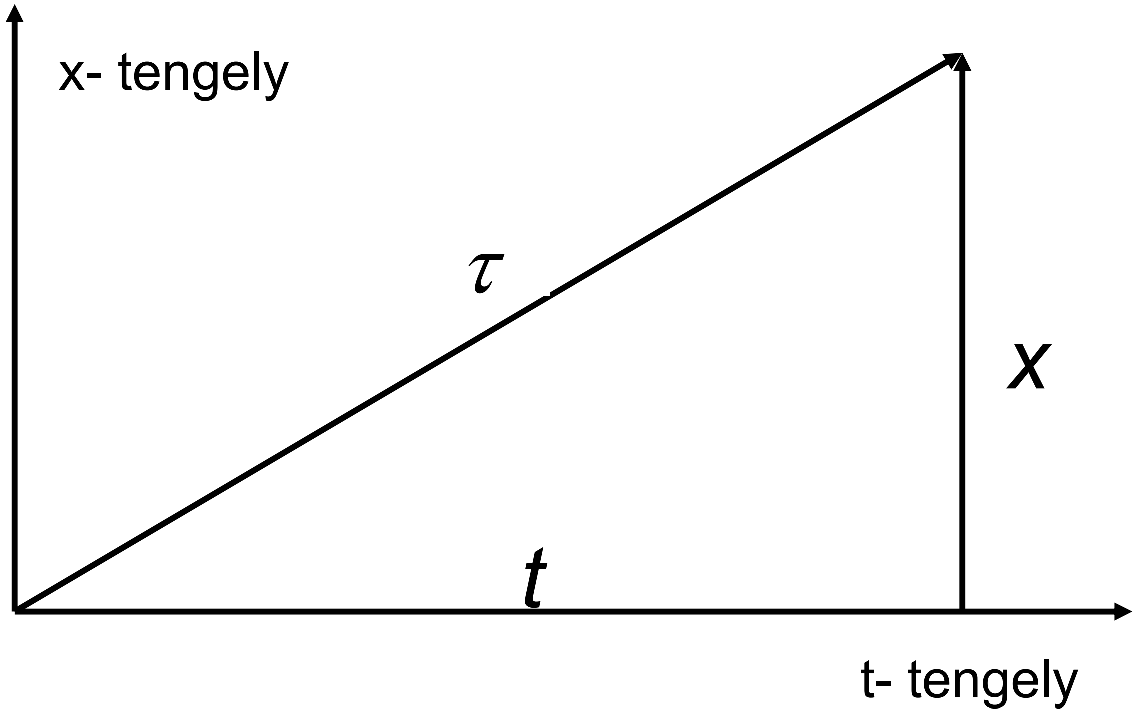
A tömeg nem abszolút

$$m_* = \frac{m}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

m a test nyugalmi tömege, abszolút.

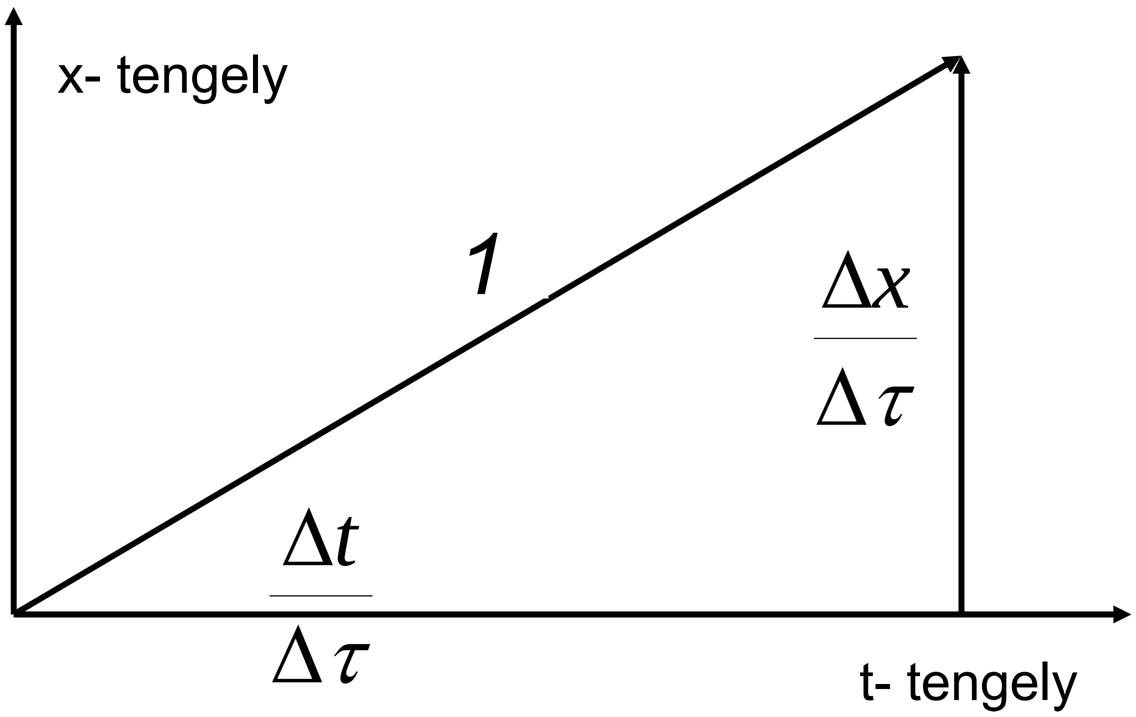
m_* *relativisztikus tömeg* nem abszolút, függ a vonatkoztatási rendszerhez viszonyított sebességtől, hiszen az *m* nyugalmi tömeget sebességtől függő mennyiséggel szoroztuk meg.

Fontos eredmény

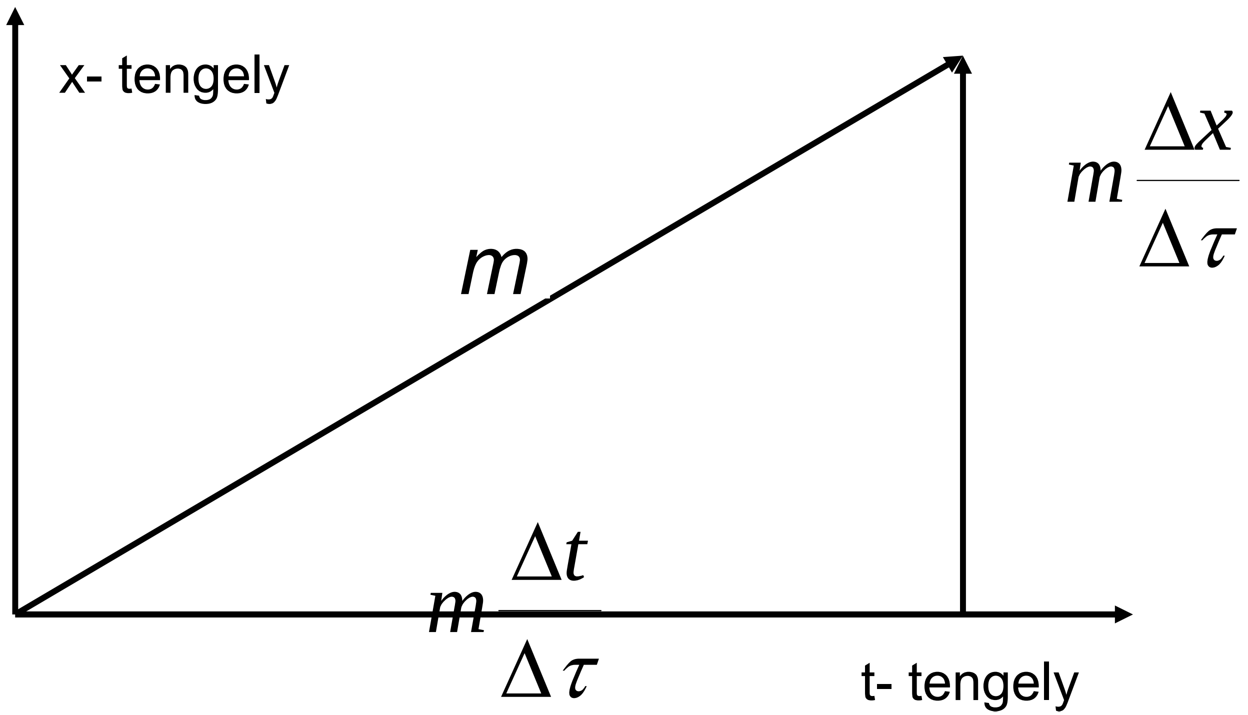
- 

$$t^2 - x^2 = \tau^2$$

Egyszerű művelet

- 

•


x- tengely
$m\dfrac{\Delta x}{\Delta \tau}$
m
$m\dfrac{\Delta t}{\Delta \tau}$
t- tengely

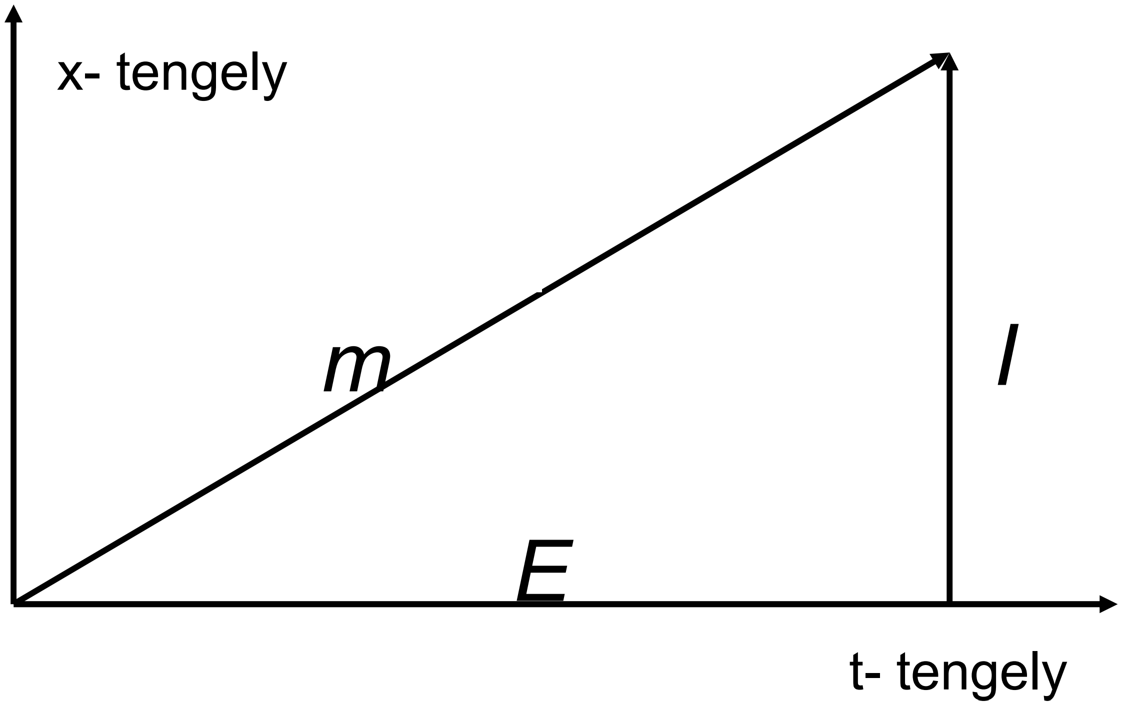
Fontos összefüggés

- A háromszög átfogója a nyugalmi tömeg, függőleges oldala az impulzus, a vízszintes oldalt jelöljük *E*-vel. Helyesen, mert közelítőleg mc^2 (nyugalmi energia) és a hagyományos mozgási energia összege:

$$E = m\frac{\Delta t}{\Delta \tau} = m\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} \approx m + m\frac{\beta^2}{2}$$

$$E = m\frac{c^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \approx m \cdot c^2 + m\frac{v^2}{2}$$

•



$$E^2 - I^2 = m^2$$

Nyugalmi tömeg

Ha *I=0*, vagyis a test áll, akkor $E=m$ ($E=mc^2$), az energia arányos az *m* nyugalmi tömeggel. (*E* nő ⇨ *m* nő.)

A nyugalmi tömeg abszolút, mind a sajátidő. A tömeg két tulajdonsága szétválik: a nyugalmi tömeg abszolút, de nem megmaradó, a mozgási tömeg relatív, de megmaradó.

Tér-idő-anyag

- Helykoordináta ⇨ impulzus
- Rendszeridő ⇨ energia
- Sajátidő ⇨ nyugalmi tömeg

A legfontosabb mennyiségek közötti kapcsolattal foglalkoztunk, nem foglalkoztunk a dinamikai törvényekkel: Newton II. törvényével, munkatétellel.

De már nem okozna meglepetést…

- A diasorozat középiskolások számára Egerben (Neumann Szakközépiskola) 2005 március 22-én tartott előadáshoz készült.
- Javasolt irodalom:

Baranyi Károly: A fizikai gondolkodás iskolája I-III. Akadémiai Kiadó, 1992.

Taylor – Wheeler: Téridő – fizika, Gondolat 1974