

1) Speciális relativitáselmélet

1.1. Bevezetés

https://dtp.physics.bme.hu/sites/dtp.physics.bme.hu/files/A%20specialis%20relativitas%20teljes_0.pdf 1-3 oldal.

1.1.1. A Newtoni fizika axiómái:

Newton-féle inerciarendszer

Inerciarendszer

Azt a vonatkoztatási rendszert amiben érvényes Newton I. törvénye inerciarendszernek nevezzük.

Galilei-féle relativitási elv:

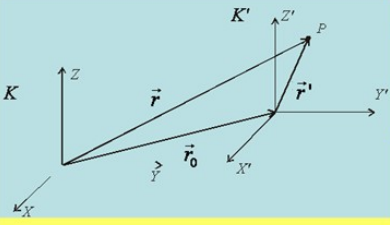
Ha egy rendszer inerciarendszer akkor a hozzá képest egyenes vonalú egyenletes mozgást végző koordináta-rendszer is inerciarendszer.

5

Galilei-féle transzformáció

Egymáshoz képest mozgó vonatkoztatási rendszerek

a) Egyenes vonalú, egyenletes transzlációt végző koordináta-rendszerek



$\vec{r} = \vec{r}_0 + \vec{r}' = \vec{v}_0 t + \vec{r}'$

A sebességek:
 $\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{v}'$

a gyorsulások ($\vec{v}_0 = \text{áll.}$):
 $\vec{a} = \vec{a}'$

Galilei-féle relativitási elv:
Az egymáshoz képest egyenes vonalú, egyenletes transzlációt végző koordináta-rendszerek a mechanikai jelenségek leírása szempontjából egyenértékűek. Ha az egyik ilyen rendszer inerciarendszer, akkor a másik is az.

Elektromágneses hullámok (Maxwell) – Éterelmélet?

Maxwell-egyenletek

	<i>Elnevezés</i>	<i>Matematikai alak</i>	<i>Jelentés</i>
I.	Gauss törvénye elektromos térre	$\oint_f \vec{D} d\vec{f} = \int \rho dV \quad \text{div} \vec{D} = \rho$	Az elektromos tér forrásai az elektromos töltések
II.	Gauss törvénye mágneses térre	$\oint_f \vec{B} d\vec{f} = 0 \quad \text{div} \vec{B} = 0$	A mágneses tér forrásmentes
III.	Faraday törvénye	$\oint_s \vec{E} d\vec{l} = - \frac{d}{dt} \int_f \vec{B} d\vec{f} \quad \text{rot} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$	A változó mágneses tér balcsavaros örvényes elektromos teret kelt
IV.	Ampere – Maxwell törvénye	$\oint_s \vec{H} d\vec{l} = \int_f \vec{J} d\vec{f} + \frac{d}{dt} \int_f \vec{D} d\vec{f}$ $\text{rot} \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$	Az elektromos áram és a változó elektromos tér jobbsavaros mágneses teret kelt.

Munkássága

- Elszakadó, térben tovaterjedő elektromágneses mező → elektromágneses sugárzás
- Transzverzális hullám tulajdonságai
- Vákuumbeli terjedési sebessége = $3 \times 10^8 \text{ m/s} = \text{fénysebesség}$

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

↓

A fény is elektromágneses hullám

1.1.2. Probléma: A fény terjedési sebessége független a megfigyelő sebességétől – Michelson – Morley kísérlet – A fény terjedési sebessége minden vonatkoztatási rendszerben ugyanannyi!

A Michelson-Morley kísérlet (1887)

Az interferométer

$t_1 = \frac{L}{c+v} + \frac{L}{c-v} = \frac{2cL}{c^2-v^2} = \frac{2L}{c} \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1}$
 $t_2 = \frac{2L}{\sqrt{c^2-v^2}} = \frac{2L}{c} \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1/2}$

$v = 3 \cdot 10^4 \text{ m/s}$
 $(1-x)^{-1} \approx 1 + x \quad (\text{ha } x \ll 1)$

$t_1 \approx \frac{2L}{c} \left(1 + \frac{v^2}{c^2}\right)$

$t_2 \approx \frac{2L}{c} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2}\right)$

$\Delta t = t_1 - t_2 = \frac{Lv^2}{c^3}$

$I = \frac{I_0}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$

A kísérlet eredménye:

$t_1 - t_2 = 0$

$t_1 = t_2$

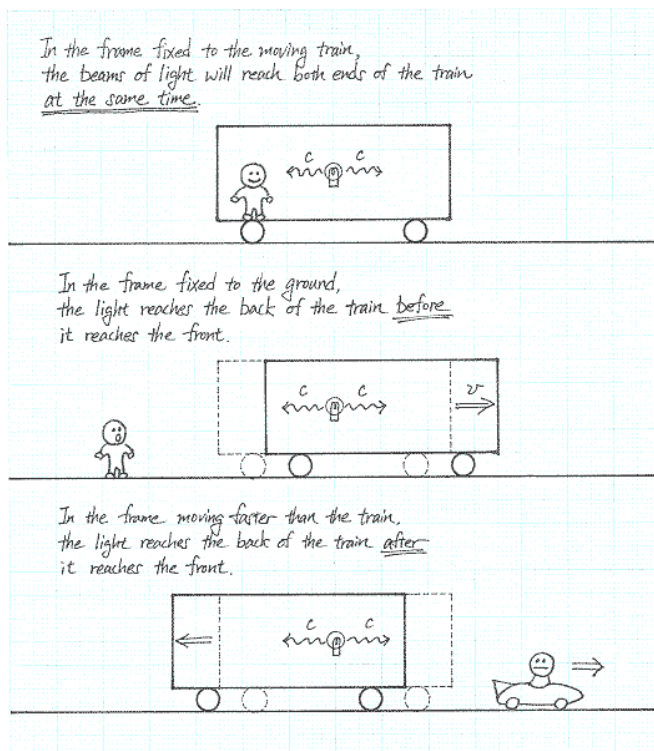
1.2. A speciális relativitáselmélet axiómái

Speciális relativitáselmélet - Axiómák

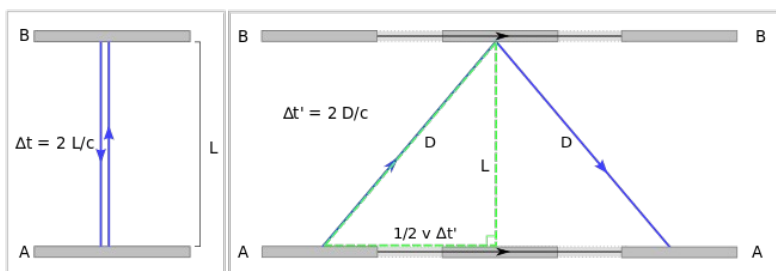
- Minden fizikai jelenségnek, és így a jelenség leírását megadó elmélet matematikájának azonosan kell kinéznie minden inerciarendszerben.
- A vákuumbeli fénysebesség, melyet általában c -vel jelölnek, állandó, bármely inerciarendszerből is mérjük meg és bármelyik irányban, függetlenül a fény frekvenciájától, a detektor, illetve a fényforrás mozgási sebességétől.

Következmények

1.2.1. Nincs abszolút idő, az egyidejűség relatív, megfigyelőfüggő



1.2.2. Az idő relatív, megfigyelőfüggő, az álló rendszerben a legrövidebb – sajátidő – idő dilatáció



Time Dilation

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

the proper time, or one-position time

the observer time, or two-position time

- v is the relative velocity between inertial reference frames
- c is the speed of light in a vacuum

@PhysicsOfTheUniverse

Kísérleti bizonyíték: Müonok, Gyorsítók, CERN, GPS

Time Dilation: Is it real? Cosmic Muons!

Muons: unstable particles with a decay life-time of: $t = 1.56 \mu\text{s} = 0.00000156 \text{ s}$
(After $1.56 \mu\text{s}$ half of them survive, after $2 \times 1.56 \mu\text{s}$ 25%, etc.)

Muon particles are produced at 10 km height (by cosmic rays) with 98% light-speed.

Expectation: even travelling at light-speed would take them a time:

$$t = 10 \text{ km} / 300\,000 \text{ km/s} = 33 \mu\text{s}$$

to reach the ground = 22 x half-life time.

Expect: 1 in a million muons arrive on the ground.

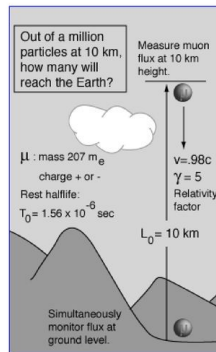
Measurement: ~ 5% makes it to the ground!

$$\text{Relativity: } \gamma = 1 / \sqrt{1 - 0.98^2} \approx 5$$

$$\rightarrow \text{Lifetime} = 5 \times 1.56 \mu\text{s} = 7.8 \mu\text{s}$$

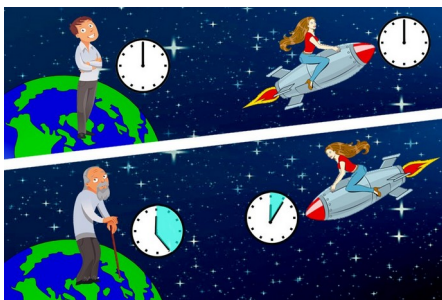
Consistent with observation!

$$\text{Since: } \frac{1}{2}^{(33/7.8)} = 0.05 \rightarrow 5\%$$



Also in GPS navigation devices relativity is essential!

Ikerparadoxon



1.2.2. A távolság relatív, megfigyelőfüggő, az álló rendszerben a legrövidebb – távolság kontrakció

Távolság-kontrakció

A K' rendszerben nyugodjon egy $l_0 = \Delta x'$ hosszúságú rúd. A K rendszerben egyidejű leolvasást végezve ($\Delta t = 0$) mérjük meg e hosszát. Azt tapasztaljuk, hogy

$$\Delta x = l_0 = k \Delta x'$$

azaz, a K -beli megfigyelő a rudat

$$\Delta x = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

hosszúságúnak fogja találni.

→ A műton a 30 km-es utat a saját rendszeréből csak 300 m-nek méri!

Dr. Péter Fehér
Eötvös Loránd Tudományegyetem

If the length $L_0 = x'_2 - x'_1$ is measured in the moving reference frame, then $L = x_2 - x_1$ can be calculated using the Lorentz transformation.

$$L_0 = x'_2 - x'_1 = \frac{x_2 - vt_2 - x_1 + vt_1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

But since the two measurements made in the fixed frame are made simultaneously in that frame, $t_2 = t_1$, and

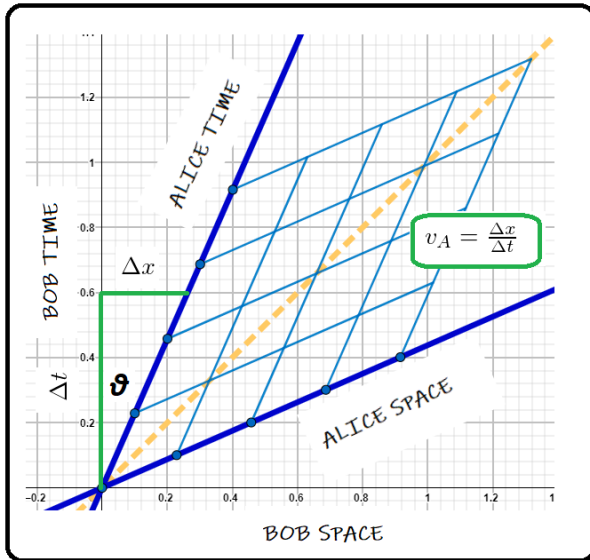
$$L = L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \frac{L_0}{\gamma}$$

Length contraction

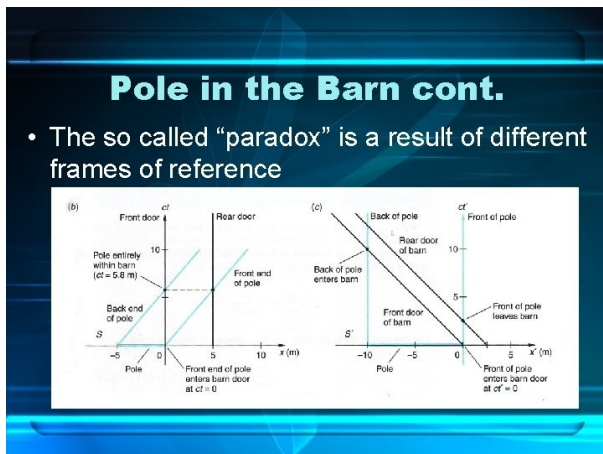
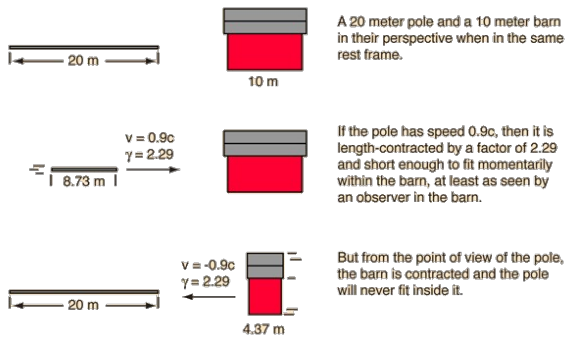
1.2.3. Lorentz-transzformáció

$$\begin{aligned} x' &= \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \\ y' &= y \\ z' &= z \\ t' &= \frac{t - \frac{vx}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \end{aligned} \tag{18.2}$$

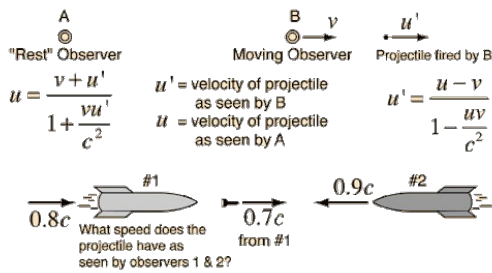
1.2.4. Tér-idő diagram



<http://fizikaiszemle.hu/archivum/fsz0601/NagyP.pdf>



1.2.5. Sebesség összehásh $\text{https://calmarius.net/?lang=hu\&page=_sitemap}$



1.2.6. Relativisztikus Tömeg

15

A relativisztikus tömeg és impulzus (15)

Az m_0 a tömegpont nyugalmi tömege. A K' rendszerben hozzá képest v sebességgel mozgó tömegpont mozgási tömege ezért:

$$m(v) = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

(Lewis, Tolman, 1909). Az impulzus tömegszer sebesség kifejezése ennek megfelelően:

$$p = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Dr. Miklós Fejénc
 BME Fizika Tanszék

1.2.7. Nyugalmi energia

[https://dtp.physics.bme.hu/sites/dtp.physics.bme.hu/files/A specialis relativitas teljes 0.pdf](https://dtp.physics.bme.hu/sites/dtp.physics.bme.hu/files/A%20specialis%20relativitas%20teljes%200.pdf) 11. oldal

Az impulzus és a mozgási energia relativisztikus alakja

$$E = \gamma mc^2$$

$$p = \gamma mv$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

A relativisztikus mozgásegyenlet (Newton II. törvénye)

$$\vec{F} = \frac{d}{dt}(m\vec{v}) = \frac{dm}{dt} \cdot \vec{v} + m \cdot \frac{d\vec{v}}{dt}$$

A teljesítménytétel relativisztikus általánosításával eljuthatunk a relativisztikus mozgási energiához:

$$T = mc^2 - m_0c^2 = m_0\gamma c^2 - m_0c^2 = m_0c^2(\gamma - 1)$$

A tömeg–energia egyenértékűség.

- Einstein-féle összefüggés!

$$E=mc^2$$

A **tömeg-energia ekvivalencia** a speciális relativitáselmélet egyik következménye, mely szerint a test nyugalmi energiája (E) megegyezik a tömeg (m) és a fénysebesség (c) négyzetének szorzatával:

Speciális relativitáselmélet középiskolás szinten (Videó sorozat, nagyon jó):

<https://www.youtube.com/playlist?list=PLfX6LA3htOQA21vOHYL1NWAk0SQvICAX5>