



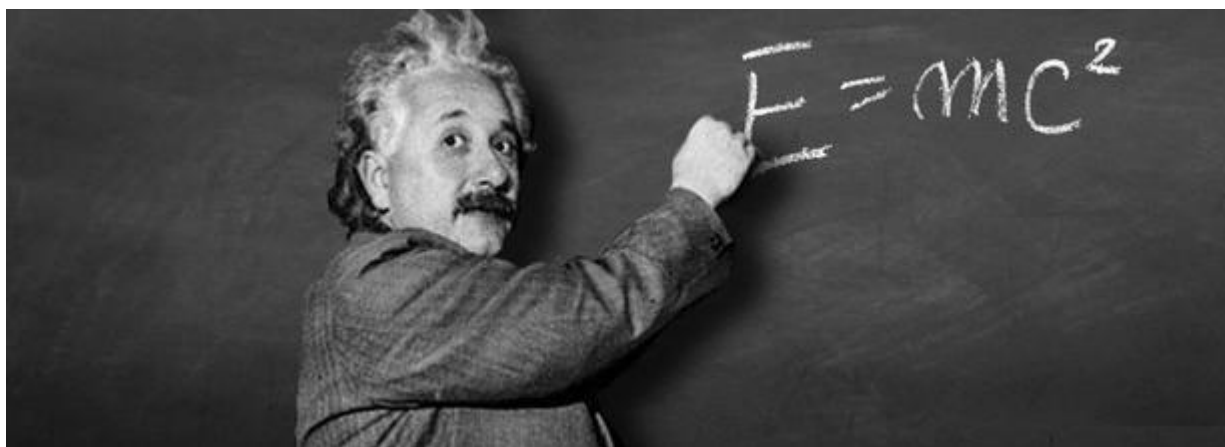
EINSTEINOVA RELATIVITA



Pavel Stránský

Ústav částicové a jaderné fyziky
Matematicko-fyzikální fakulta Univerzity Karlovy

www.pavelstransky.cz



Pohyb a dějiny

Aristoteles (4. století př.n.l.)

- Přirozeným stavem věcí je klid, nehybnost.
- Věci se pohybují díky silám.

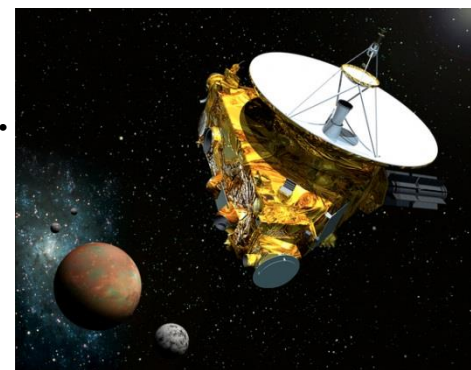


Galileo Galilei (počátek 17. století)

- Nebrzděný rovnoměrný přímočarý pohyb je trvalý, přirozený.
- Klid je jen speciální případ pohybu.
- Jsou to síly tření, které způsobují, že se pohyb zastaví.

Galileiho princip relativity:

Všechny inerciální soustavy jsou rovnocenné.
Platí v nich stejné přírodní zákony.



sonda New Horizons na cestě k Plutu

Důsledek:

- rychlost a polohu má smysl udávat jen ve vztahu k jinému místu

Pohyb a dějiny

Aristoteles (4. století př.n.l.)

- Přirozeným stavem věcí je klid, nehybnost.
- Věci se pohybují díky silám.

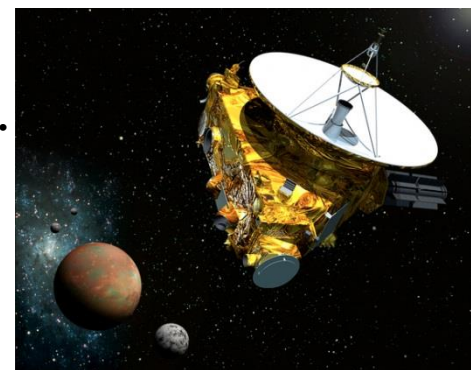


Galileo Galilei (počátek 17. století)

- Nebrzděný rovnoměrný přímočarý pohyb je trvalý, přirozený.
- Klid je jen speciální případ pohybu.
- Jsou to síly tření, které způsobují, že se pohyb zastaví.

Galileiho princip relativity:

Všechny inerciální soustavy jsou rovnocenné.
Platí v nich stejné přírodní zákony.



sonda New Horizons na cestě k Plutu

Albert Einstein (počátek 20. století)

Princip konstantní rychlosti světla:

Světlo se ve všech inerciálních soustavách pohybuje stejnou konečnou rychlostí $c = 300\,000\text{ km/s}$.

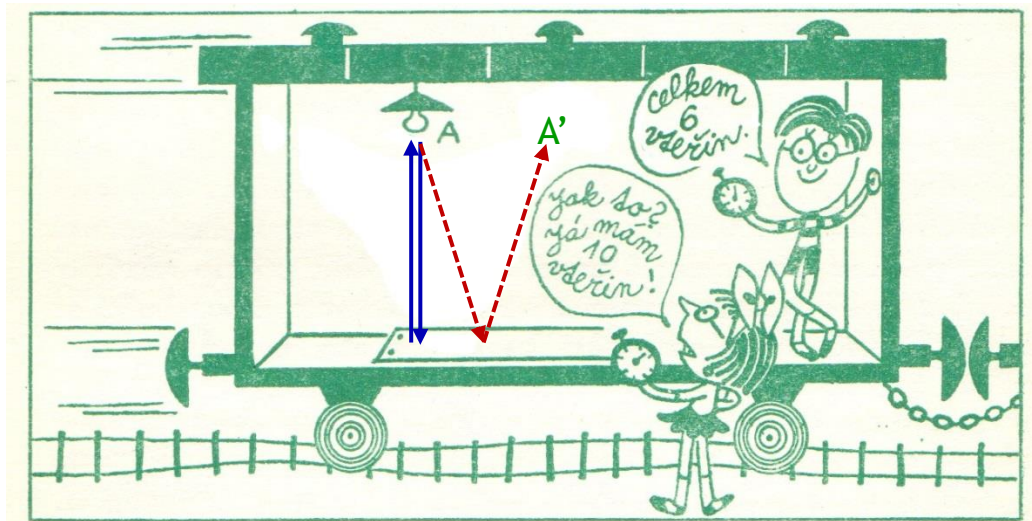
Experimentálně ukázáno

- Fizeau 1850
- Michelson-Morley 1880'

Čas

Einsteinův expres

- má extrémní rozměry a jede stálou extrémní rychlostí $v = 240\,000\text{ km/s}$



Kluk ve vlaku

$$\begin{aligned}\text{dráha světla} &= 2 \times \text{výška vagónu} \\ &= 1\,800\,000\text{ km}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{kluk naměří čas} &= \text{dráha světla} / c \\ &= 6\text{ vteřin}\end{aligned}$$

Dívka na nástupišti

dráha, kterou vlak urazí za 5 vteřin (1 200 000 km)

dráha, kterou světlo
urazí za 5 vteřin
(1 500 000 km)



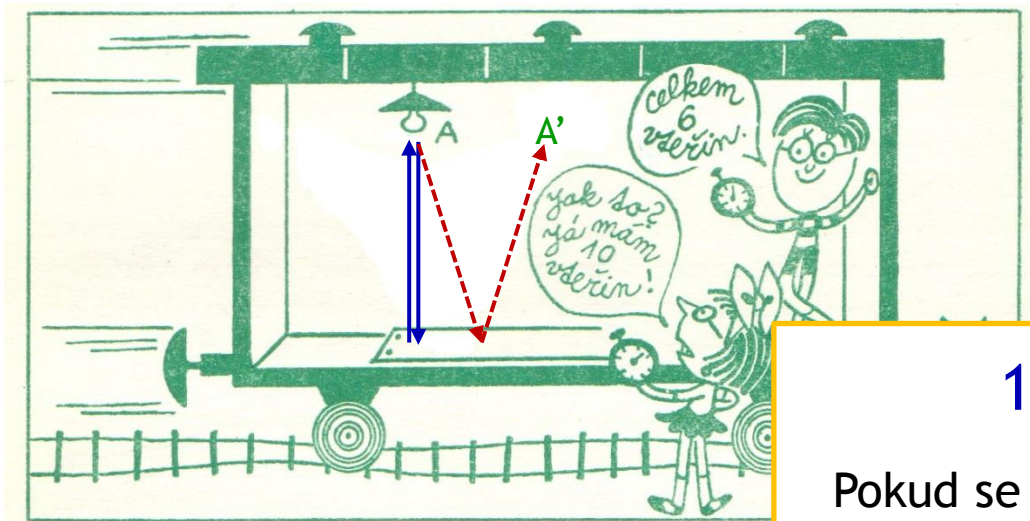
výška vagónu podle Pythagorovy věty:

$$h = \sqrt{1500000^2 - 1200000^2}\text{ km} = 900000\text{ km}$$

Čas

Einsteinův expres

- má extrémní rozměry a jede stálou extrémní rychlostí $v = 240\,000\text{ km/s}$



Kluk ve vlaku

dráha světla = 2 x výška vagónu
= 1 800 000 km

Dívka na nástupišti

dráha, kterou vlak urazí za 5 vteřin (1 200 000 km)

dráha, kterou světlo urazí za 5 vteřin
(1 500 000 km)



výška vagónu pod

$$h = \sqrt{1500000^2 - 1200000^2}$$

1. Dilatace času

Pokud se nějaká věc pohybuje vůči mně rychlostí v , plyne pro ni čas pomaleji.

$$t_d = \gamma t_k$$

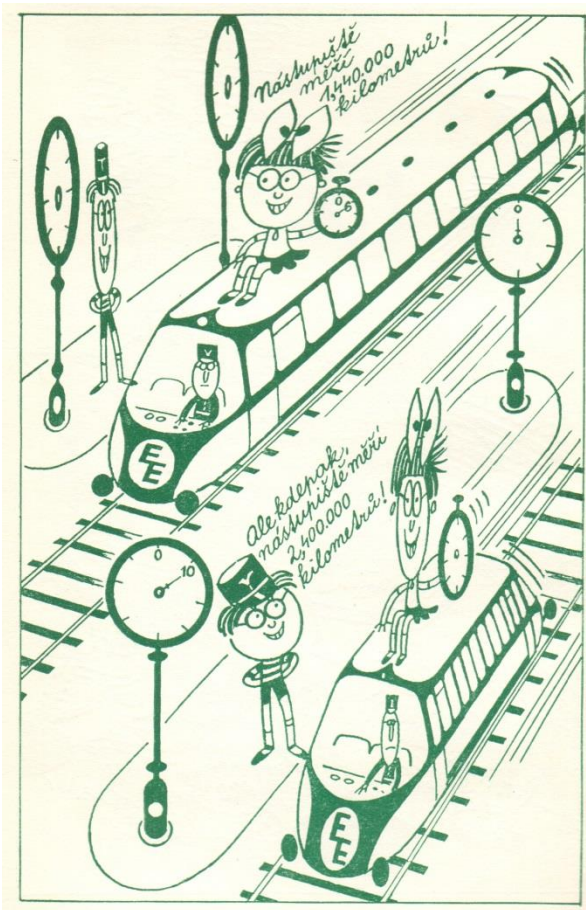
$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \geq 1$$

Lorenzův faktor

Rozměry

Einsteinův expres

- má extrémní rozměry (délka 2 400 000 km) a míjí stejně dlouhé nástupiště
- jede stálou extrémní rychlostí $v = 240\,000\text{ km/s}$



Dívka ve vlaku

- podle údajů staničních hodin projede nástupiště od začátku do konce za 10 vteřin
- její hodiny však ukážou 6 vteřin - nástupiště, které se vůči ní pohybuje, uvidí kratší

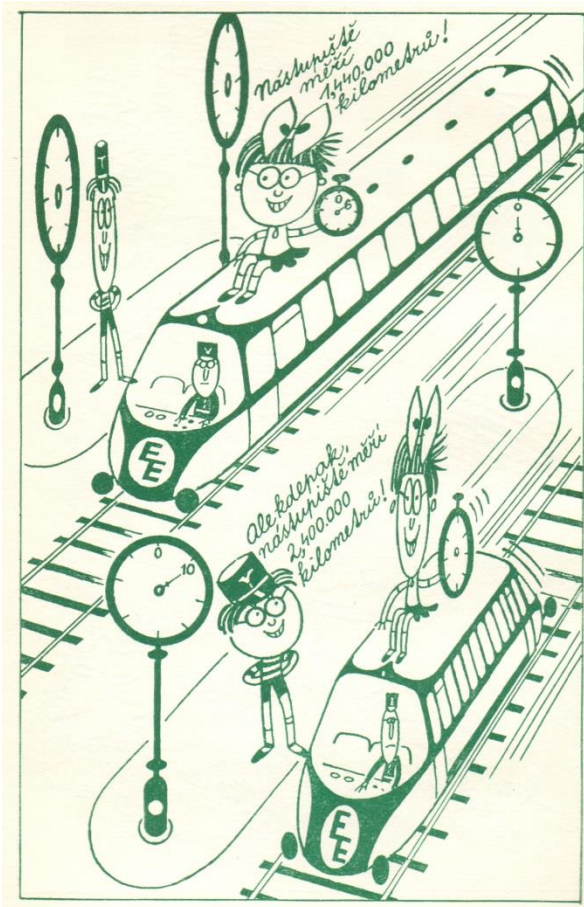
Kluk na nástupišti

- mezi vjezdem začátku a konce vlaku do nádraží uplyne ve vlaku 10 vteřin
- nádraží se však vůči vlaku pohybuje a na nástupišti uplyne jen 6 vteřin - vlak se klukovi bude jevit kratší

Rozměry

Einsteinův expres

- má extrémní rozměry (délka 2 400 000 km) a míjí stejně dlouhé nástupiště
- jede stálou extrémní rychlostí $v = 240\,000\text{ km/s}$



Dívka ve vlaku

- podle údajů staničních hodin projede nástupiště od začátku do konce za 10 vteřin

2. Kontrakce délek

Pokud se nějaká věc pohybuje vůči mně rychlostí v , jeví se mi kratší.

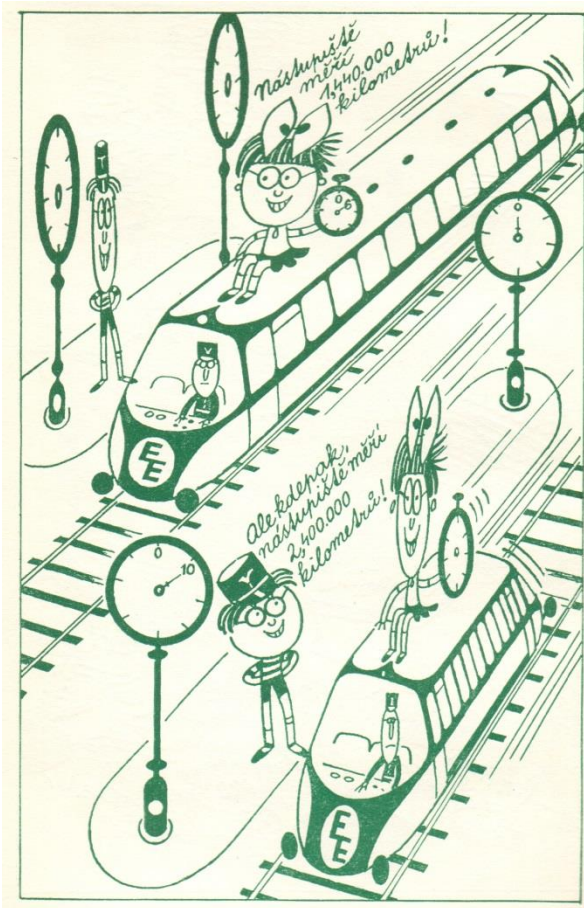
$$l_k = \frac{l_d}{\gamma}$$

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

Lorenzův faktor

Časoprostorový interval

$$= \text{vzdálenost}^2 - (c \times \text{doba})^2$$



Jaký je prostoročasový interval mezi průjezdem začátku a konce vlaku začátkem nástupiště?

Dívka ve vlaku

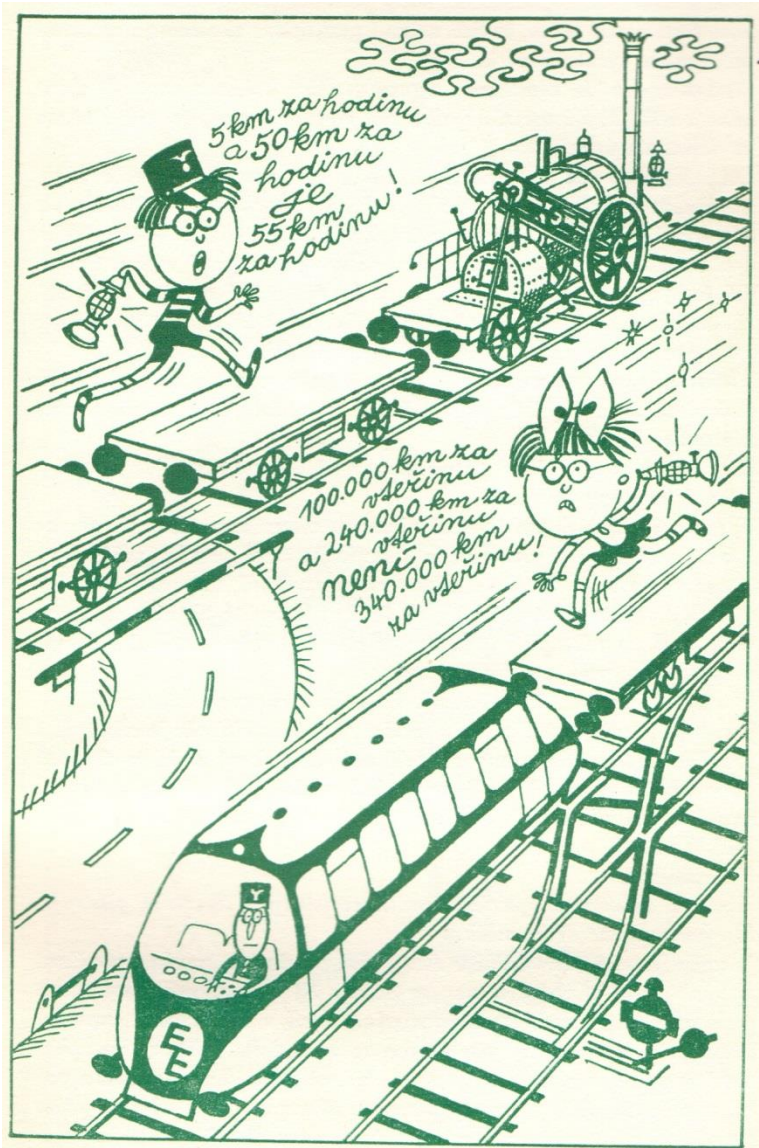
$$\text{ČI} = \text{délka vlaku}^2 - (c \times 10 \text{ vteřin})^2 = -3\,240\,000\,000\,000$$

Chlapec na nástupišti

$$\text{ČI} = 0^2 - (c \times 6 \text{ vteřin})^2 = -3\,240\,000\,000\,000$$

- Stejně pro pozorovatele pohybující se jakoukoliv rychlostí.
- Prostor a čas jsou promíchány.

Skládání rychlostí



Rychlost pozorovaná na nástupišti

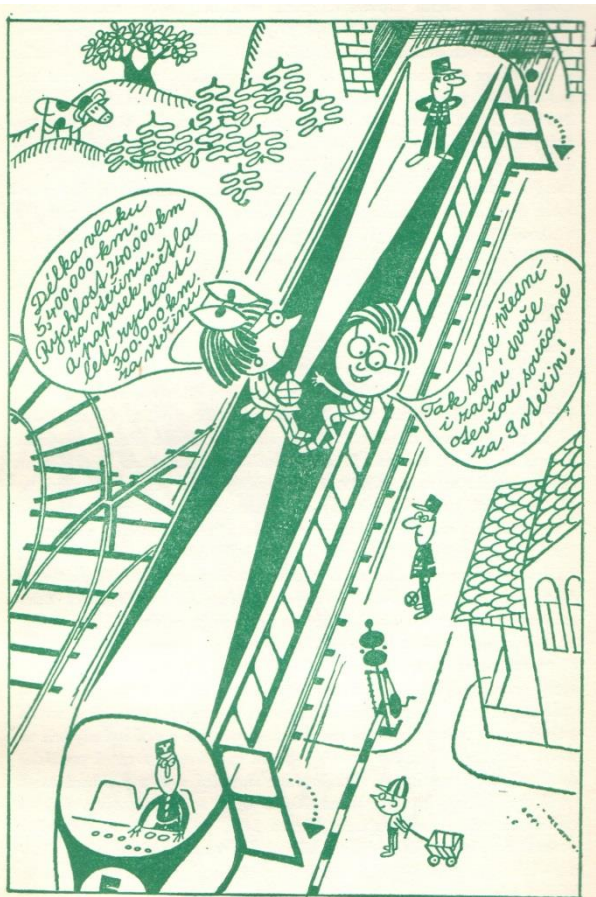
$$= \frac{\text{vlak} + \text{dívka}}{1 + \frac{\text{vlak} \times \text{dívka}}{c^2}}$$

- Pozorovaná rychlost je vždy menší než pouhý součet rychlostí.
- Pokud se vlak (nebo dívka) pohybují rychlostí světla, pak je výsledná rychlost také světelná.

Současnost

Einsteinův expres

- má extrémní rozměry (délka 5 400 000 km)
- jede stálou rychlostí $v = 240\,000\text{ km/s}$



Pozorování z vlaku

- **přední a zadní dveře se otevřou zároveň**

Pozorování z nástupiště

- vlak je kratší, měří jen 3 240 000 km
- k zadním dveřím světlo dolétne za 3 vteřiny
 - k předním dveřím dolétne za 27 vteřin
- **zadní dveře se otevřou o 24 vteřin dříve**



Současnost

Einsteinův expres

- má extrémní rozměry (délka 5 400 000 km)
- jede stálou rychlostí $v = 240\,000\text{ km/s}$

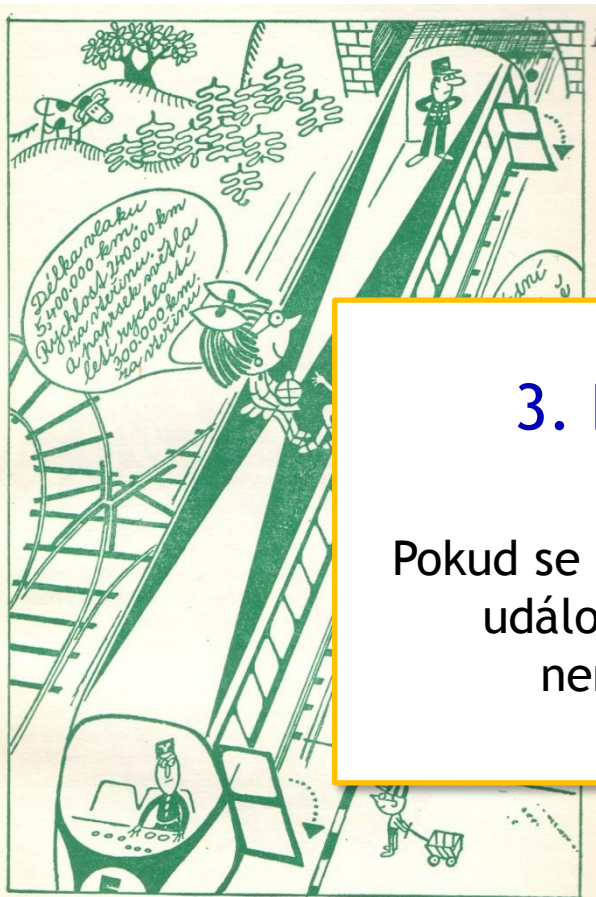
Pozorování z vlaku

- **přední a zadní dveře
se otevřou zároveň**

3. Relativita současnosti

Pokud se nějaká věc pohybuje vůči mně, pak události, které jsou pro ni současné, nemusejí být současné pro mě.

- **zadní dveře se otevřou
o 24 vteřin dříve**



Hmotnost



4. Souvislost mezi hmotností a energií

Pokud se nějaká věc pohybuje vůči mně, pak roste její hmotnost.

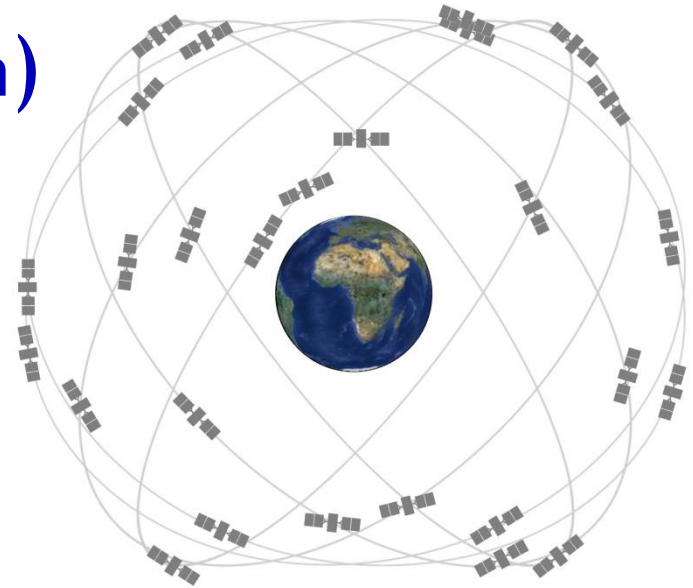
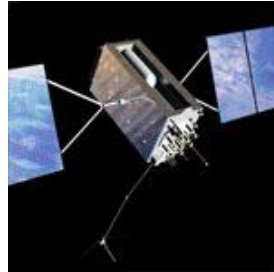
$$m = \gamma m_0 \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \geq 1$$

Lorenzův faktor

Celková energie věci o hmotnosti m je

$$E = mc^2$$

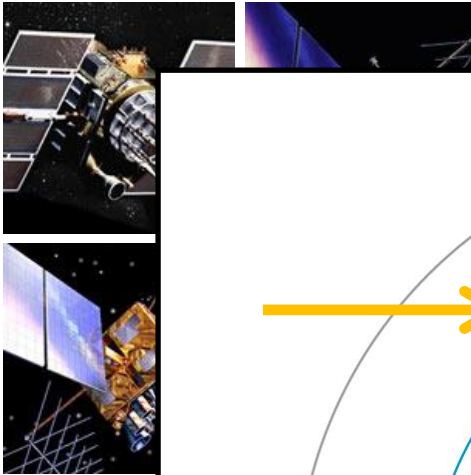
GPS (Global Positioning System)



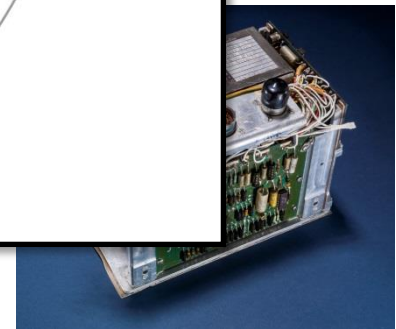
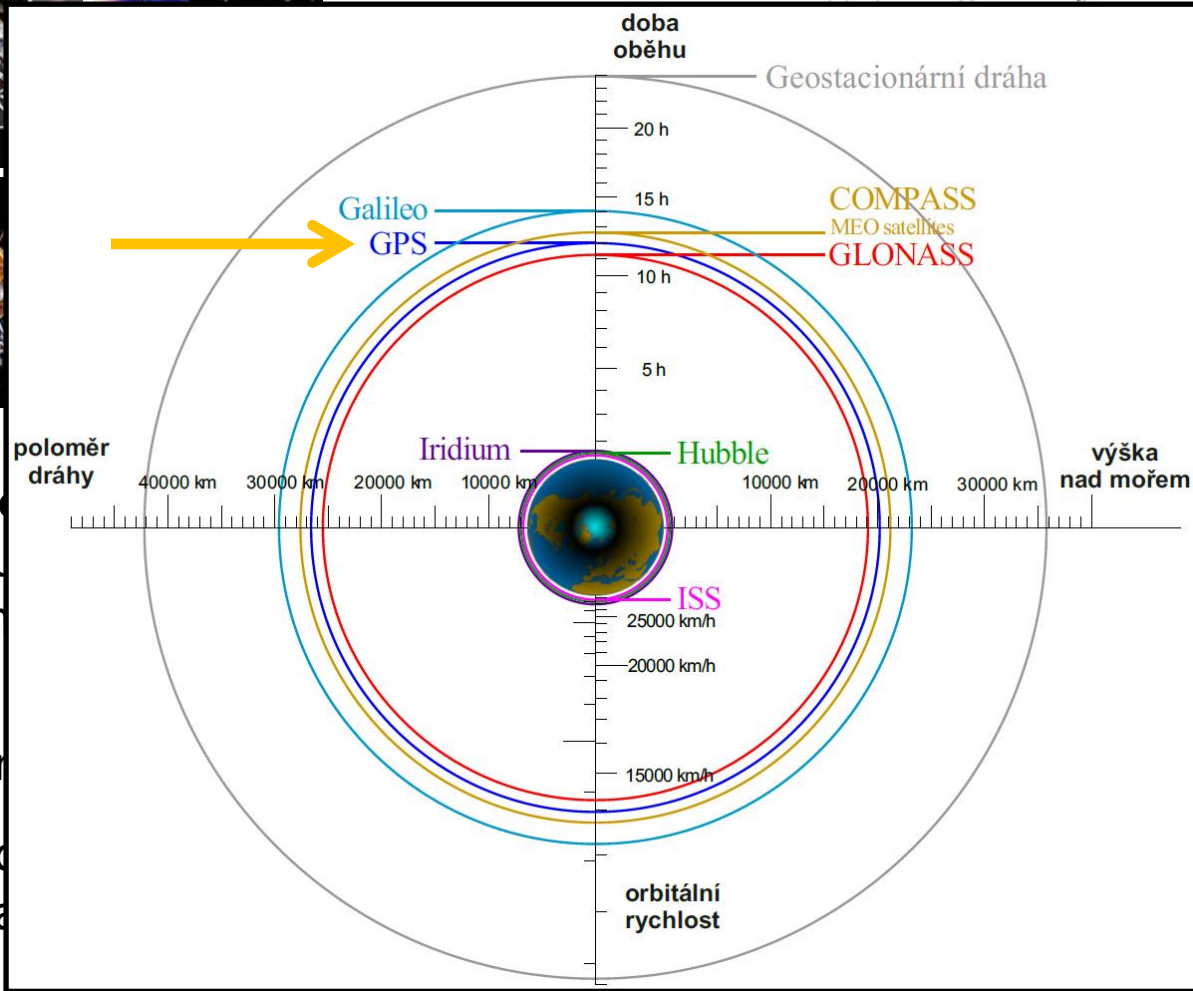
- **32 družic** obíhajících Zemi ve výšce cca **20 000 km** (v každou chvíli je na každém bodě Země vidět minimálně 9 družic)
- Rychlost družice vůči *nerotující* Zemi je cca **4 km/s** (každá družice Země oběhne 2x za den)
- V každé družici - **atomové hodiny**, které se za den opozdí nanejvýš o 1 nanosekundu



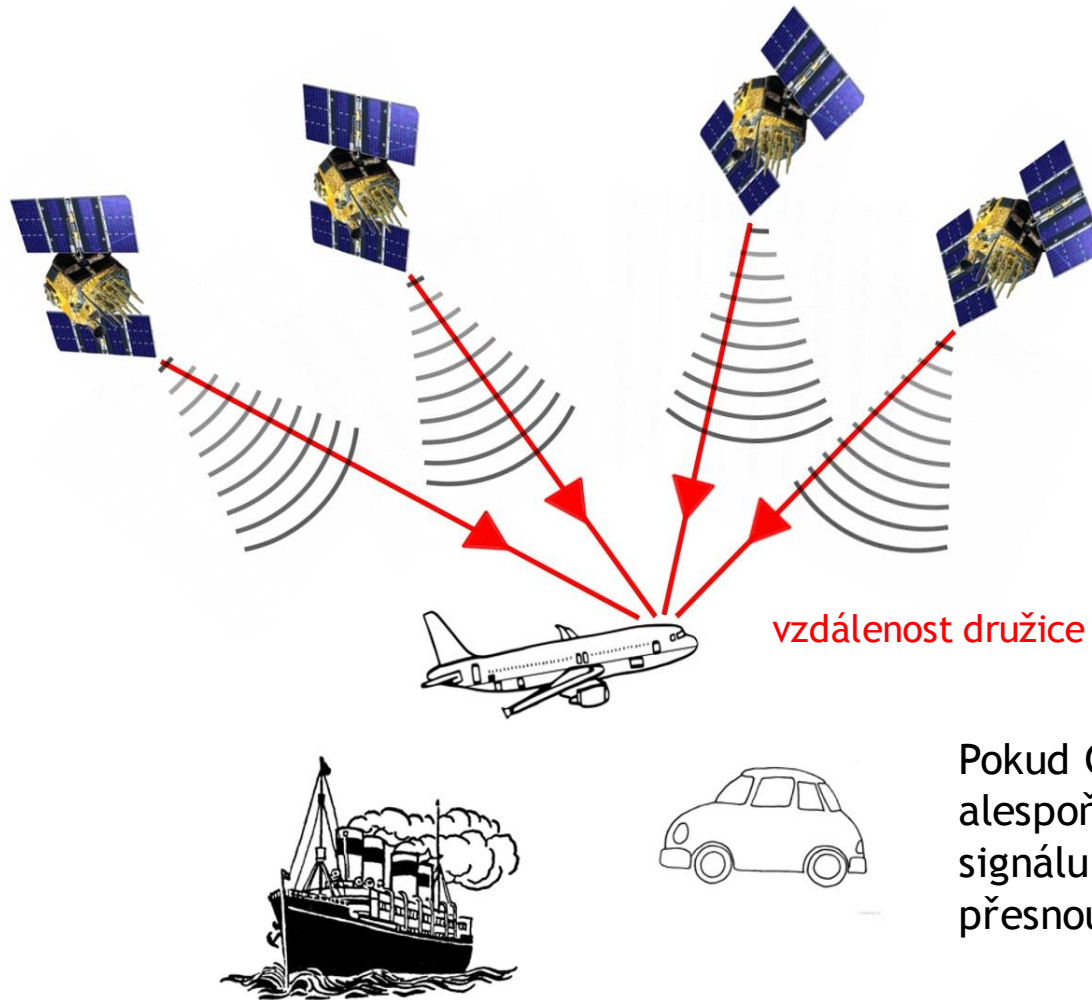
GPS (Global Positioning System)



- 32 družice (v každou minutu minimálně)
- Rychlost (každá dráha)
- V každé době opozdí na



Jak GPS funguje



Každá družice vysílá údaj o své poloze a o svém čase.

Signál se šíří rychlostí světla c k zemi.

$\text{vzdálenost družice} = c \times \text{zpoždění signálu}$

Pokud GPS zařízení zachytí signál alespoň ze **čtyř družic**, ze zpoždění signálu vypočítá triangulací svou přesnou polohu.

1 ns chyba v měření času ➡ 30 cm chyba v měření polohy

Jak se projeví teorie relativity?

Efekty speciální relativity

- Družice se vůči nám na Zemi pohybují



čas v nich plyne **pomaleji** - **odchylka 7700 ns za den**

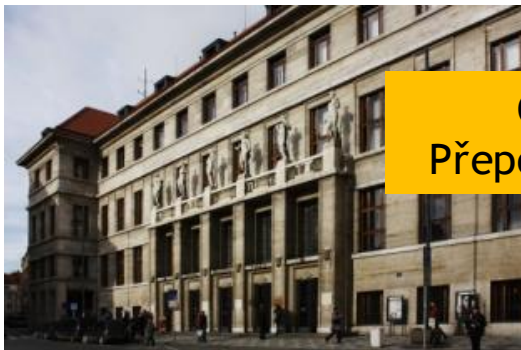
- Člověk na rovníku se pohybuje rychlostí cca 460 m/s - **odchylka 200 ns za den**

Efekt obecné relativity

- Na družice působí slabší gravitace než na pozorovatele na Zemi
- Navíc na ně působí odstředivá síla



čas v nich plyne **rychleji** než na Zemi - **odchylka 46 000 ns za den**

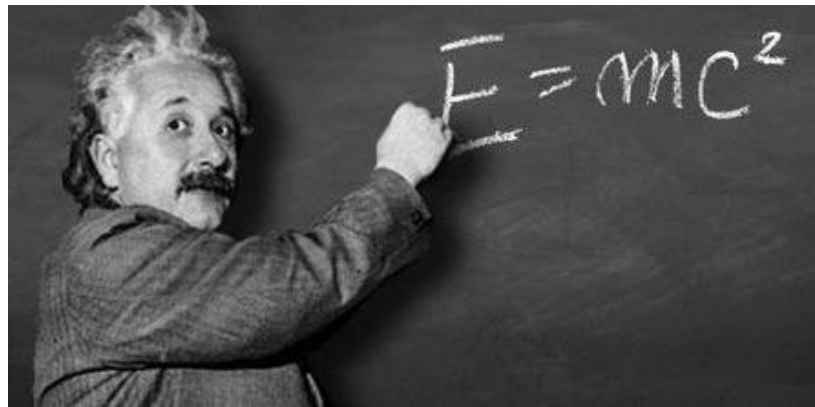


Celková odchylka: 38 000 ns za den.
Přepočteno na vzdálenost to je víc jak 10 km!



Einsteinova (speciální) relativita

- Poloha, rozměry, čas, rychlost, současnost a hmotnost nejsou absolutní pojmy - závisí na rychlosti pozorovatele
- Absolutní je rychlost světla (pro všechny pozorovatele stejná) a časoprostorový interval
- Efekty teorie relativity se projevují při vysokých rychlostech (nebo při velmi silné gravitaci)



DÍKY ZA POZORNOST

