

## 6.1.2 Postuláty speciální teorie relativity, relativita současnosti

**Předpoklady:** 6101

Konec 19. století: **Maxwellovy rovnice** (elektřina a magnetismus)  $\Rightarrow$  světlo je elektromagnetické vlnění, šíří se rychlostí  $300\,000\,000\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

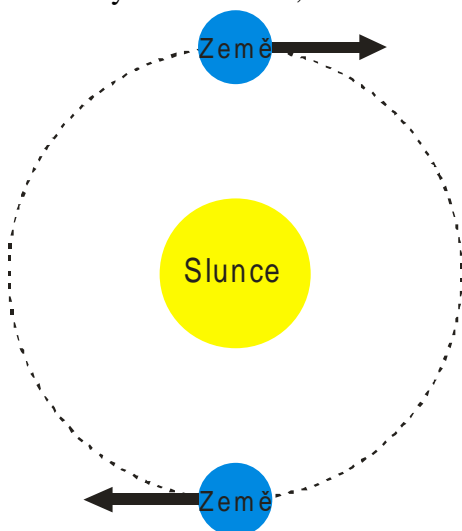
$\Rightarrow$  snaha najít materiál (hypotetické pojmenování éter), jehož vlněním je světlo.

Dva problémy:

- Podle rovnic pro mechanické vlnění by éter měl být velmi tvrdý, měl by být všude a přitom není vidět, že by brzdil Zemi (nebo cokoliv jiného).
  - Pokud je světlo vlnění éteru (který je všude), tak by éter mohl být správnou základní soustavou souřadnic = tím, co doopravdy stojí (pokusy se světlem na rozdíl od mechanických pokusů, by měly umožnit rozlišit i rovnoměrný přímočarý pohyb vůči éteru).
- $\Rightarrow$  Pokusy na měření rychlosti světla ( $\Rightarrow$  jak rychle se pohybuje Země vůči éteru).

Analogie: Projíždějící auto, jeho zvuk se mění z vysokého na hluboký  $\Rightarrow$  z rozdílu frekvencí můžeme určit, jak rychle se auto vůči nám pohybuje.

- Měření rychlosti světla z různých zdrojů: nezávisle na zdroji, vždy je rychlost světla ve vakuu  $300\,000\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$  (jakoby byl éter spojený se Zemí, což je jasně nesmyslné).
- Při obletu Slunce se Země pohybuje v různých směrech  $\Rightarrow$  mělo by to být vidět na rychlosti světla, ale světlu naměříme pořád přesně  $300\,000\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ .



$\Rightarrow$  Zřejmě základní zákon světa zní: Světlo se ve vakuu pohybuje vždy rychlostí  $300\,000\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$  nezávisle na pohybu pozorovatele i zdroje.

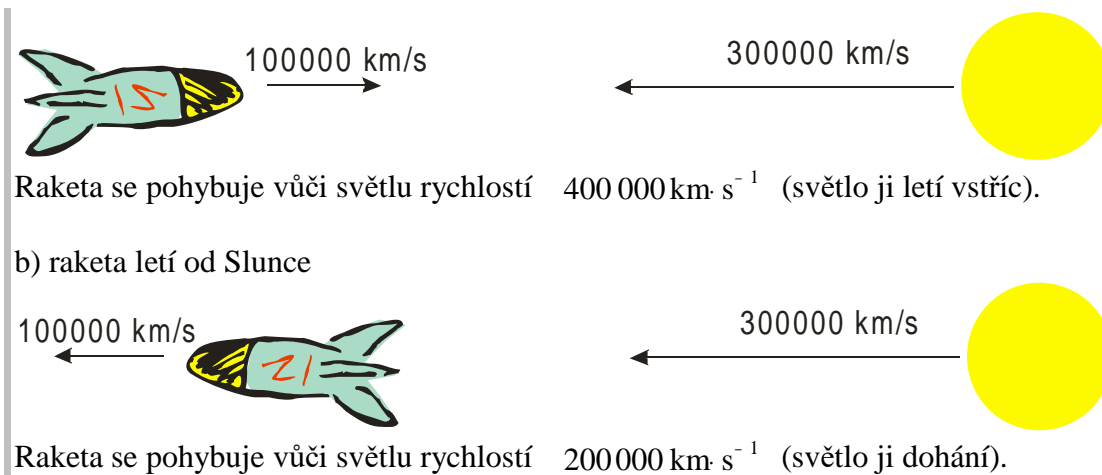
Nevypadá to moc divně, ale důsledky jsou naprosto nepřijatelné.

**Př. 1:** Světlo vyletuje ze Slunce rychlostí  $300\,000\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ . Kosmická raketa létá rychlostí  $100\,000\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ .

- a) Jakou rychlostí se pohybuje světlo vůči raketě, pokud raketa letí přímo ke Slunci?
- b) Jakou rychlostí se pohybuje světlo vůči raketě, pokud raketa letí přímo od Slunce?

Asi nejjednodušší příklad za dobu studia.

- a) raketa letí ke Slunci



**Oba výsledky jsou špatně. V obou případech se světlo pohybuje vůči raketě rychlostí  $300\,000\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ . Konstatovali jsme před příkladem, že je to základní zákon světa velmi dobře ověřený experimenty.**

**Kde se stala chyba?**

**V podstatě nikde. Toto je hlavní problém s teorií relativity: Naše očekávání jsou logická, vychází ze zkušenosti a dosud nebyla špatná. Jenže světlo se podle nich nechová.**

**Jediné řešení:** Zavrhneme všechny dosavadní představy o fungování fyziky i světa a budeme vycházet z toho, že světlo má vždy stejnou rychlost. Získat odvahu k takovému kroku byl největší problém. Trvalo to řadu let a první, kdo to dokázal, byl německý fyzik Albert Einstein.

**Pedagogická poznámka:** Příklad 1 je důležitý. I když studentům před jeho řešením řeknete, že světlo se ve vakuu vždy pohybuje rychlostí  $300\,000\text{ km/s}$ , přesto naprostá většina z nich vyřeší příklad stejně špatně jako je uvedeno v učebnici. Musíte se s nimi dohodnout na tom, že zahodí všechna sebelogičtější očekávání a budou přemýšlet pouze podle pravidel.

Speciální teorie relativity vychází ze dvou postulátů (předpokladů):

**1. princip relativity** (zobecnění Galileiho principu relativity, který platil pouze pro mechanické pokusy):

**Ve všech inerciálních souřadných soustavách (soustavy, které buď stojí nebo se pohybují rovnoměrně přímočaře) platí stejné fyzikální zákony  $\Rightarrow$  žádným fyzikálním pokusem nelze určit, jestli souřadná soustava stojí nebo se pohybuje rovnoměrně přímočaře.**

$\Rightarrow$

- Nemůžeme změřit pohyb vůči éteru (pojem éteru tím ztrácí důležitost a dnes už se nepoužívá).
- Z Maxwellových rovnic by mělo být při použití Galileiho transformace poznatelné, co se pohybuje a co stojí  $\Rightarrow$  budeme muset změnit Galileiho transformace (nebo Maxwellovy).

**2. princip konstantní rychlosti světla**

**Ve všech inerciálních soustavách má rychlost světla ve vakuu stejnou velikost, která nezávisí na směru ani na vzájemném pohybu zdroje a pozorovatele.**

- Nic jiného než konstatování experimentálního faktu, výsledků všech pokusů o měření rychlosti světla.

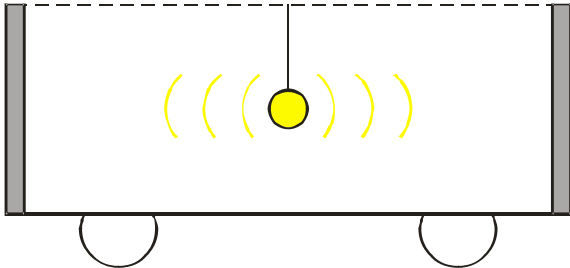
**Pokud chceme řešit problémy ve speciální teorii relativity musíme vycházet z těchto principů a ne z toho „co je normální“! (Někdy to budeme mít opravdu těžké.)**

**Relativita současnosti** (první důsledek konstantní rychlosti světla)

**Pohled klasické fyziky:** Dva studenti na dvou různých koncích třídy pustí v jednom okamžiku ze stejné výšky křídly. Vidíme, že dopadnou na zem v jednom okamžiku. Stejně to vidí všichni ostatní, bez ohledu na to jestli vůči třídě stojí nebo se vůči ní pohybují = současnost je absolutní.

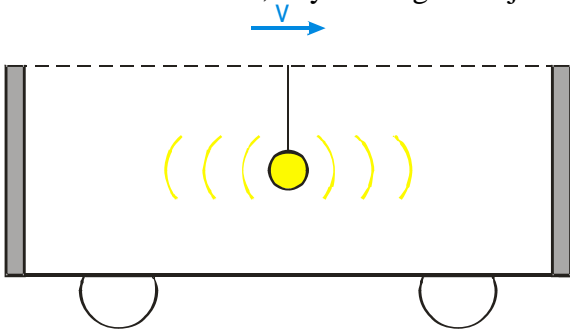
Jak je to se současností v teorii relativity?

Máme stojící dlouhý železniční vagón. Uprostřed vagónu je zavěšena lampa. Blikneme lampou, světlo se šíří na všechny strany, tedy i ke konci a začátku vagónu. Na obou koncích vagónu jsou umístěna zrcadla. Kdy se v zrcadlech zableskne?



Obě zrcadla jsou od lampy stejně daleko  $\Rightarrow$  k oběma zrcadlům dorazí světlo ve stejný okamžik  $\Rightarrow$  v obou zrcadlech se zableskne současně.

Jak se situace změní, když se vagón rozjede?

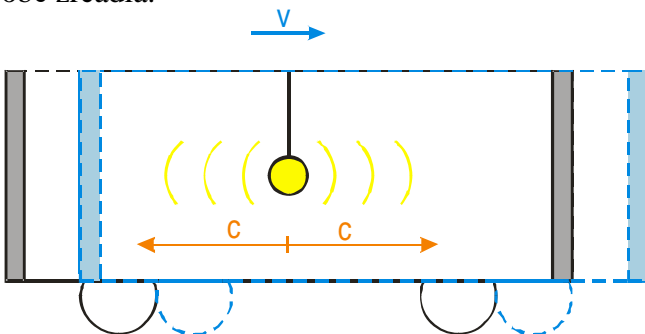


### Sledujeme situaci z vagónu

Zdá se nám, že vagón stojí a vidíme to samé co před chvílí. Světlo má k oběma koncům stejně daleko a dorazí k nim současně. Žádný problém nenastal.

### Sledujeme situaci z nádraží:

Vagón se z hlediska nádraží pohybuje  $\Rightarrow$  vzhledem k místu, ze kterého světlo vyletělo se posunou obě zrcadla.



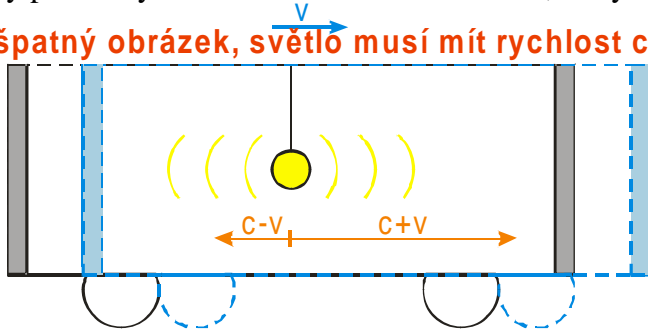
Světlo má nyní k zadnímu konci blíže než k přednímu. Protože letí vždy stejnou rychlostí  $c$ , musí dorazit k zadnímu zrcadlu dříve  $\Rightarrow$  nejdříve se zableskne v zadním zrcadle, teprve potom ze zableskne v předním  $\Rightarrow$  současnost je relativní, záleží na tom, odkud se na situaci díváme (z hlediska vagónu byl záblesk současný, z hlediska nástupiště ne).

Jak je to možné?

Jde o důsledek konstantní rychlosti světla. V klasické fyzice by se rychlost světla sčítala s rychlostí vagónu. Dopředu by světlo letělo rychlostí  $c+v$ , dozadu rychlostí  $c-v$ . Rozdíl v rychlostech

by přesně vyrovnal rozdíl ve vzdálenostech, který vznikl posunutím vagónu.

**špatný obrázek, světlo musí mít rychlost c**



**Př. 2:** Rozhodni, které fyzikální veličiny budou ovlivňovat časový rozdíl mezi zábleskem zrcadla na zadním a na předním konci vagónu při pohledu z nádraží.

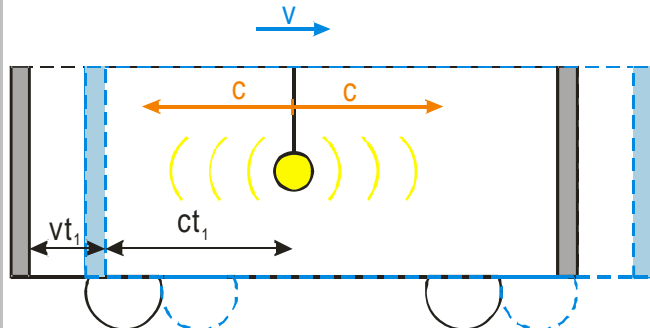
Rozdíl mezi záblesky na zadním a předním zrcadle vzniká při pohledu z nástupiště tím, že se vagón během letu světla posune  $\Rightarrow$  závisí na:

- rychlosti vagónu (rychlejší vagón se více posune),
- délce vagónu (přes delší vagón letí světlo delší dobu a tím má vagón větší čas na změnu polohy).

**Současné z hlediska všech souřadných soustav jsou pouze události souměstné (odehrávající se na jednom místě).**

**Př. 3:** Urči časový rozdíl mezi zábleskem na zadním a předním zrcadle u normálního železničního vagónu (délka 20m, rychlost 20 m/s)?

Nakreslíme si obrázek.



Pokud si označíme délku vagónu jako  $2l$  je z obrázku vidět, že pro dobu mezi bliknutím lampy a odrazem na zadním zrcadle platí:

$$l = ct_1 + vt_1 \quad \Rightarrow \quad t_1 = \frac{l}{c+v}$$

Podobně pro dobu mezi bliknutím lampy a zábleskem na předním zrcadle platí:

$$ct_2 = l + vt_2 \quad \Rightarrow \quad t_2 = \frac{l}{c-v}$$

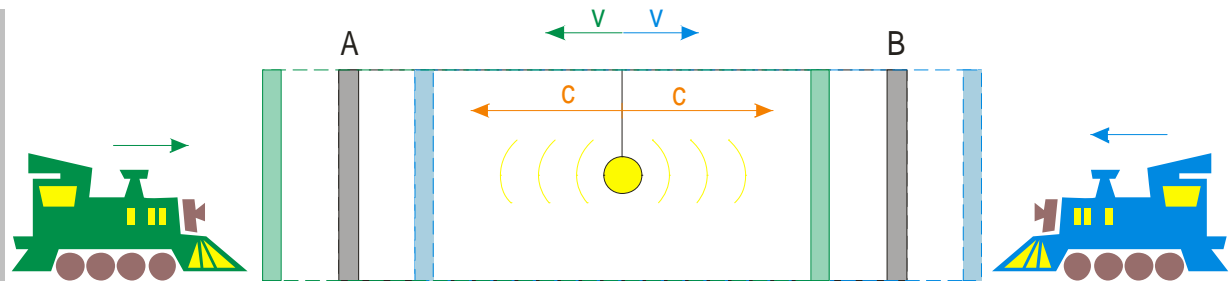
Časový rozdíl mezi bliknutími:  $\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{l}{c-v} - \frac{l}{c+v} = l \left( \frac{c+v - (c-v)}{c^2 - v^2} \right) = l \frac{2v}{c^2 - v^2}$

Dosadíme:  $\Delta t = l \frac{2v}{c^2 - v^2} = 10 \frac{2 \cdot 20}{3000000000^2 - 20^2} = 4,4 \cdot 10^{-15} \text{ s}$

Za normální situace je rozdíl mezi bliknutími zanedbatelný pouze  $4,4 \cdot 10^{-15} \text{ s}$

**Pedagogická poznámka:** Předchozí příklad řeší pouze Ti nejlepší. Snažím se, aby se celá třída dostala k příkladu 4.

**Př. 4:** Kancelář přednosta stanice je zařízena podobně jako vagón. Uprostřed místnosti je lampa, na jejích koncích dvě zrcadla. Ke stanici se blíží dva vlaky z navzájem opačných směrů. Rozhodni, ke které stěně dorazí světlo dřív z pohledu přednosta stanice i strojvůdců v obou vlacích.



- Přednosta vidí, že se v obou zrcadlech zableskne naráz.
- Oba strojvůdci ze svých vlaků vidí, že se nádraží pohybuje k nim  $\Rightarrow$
- modrý strojvůdce vidí nejdříve záblesk v zrcadle A (toto zrcadlo se z jeho pohledu přibližuje k lampě),
- zelený strojvůdce vidí nejdříve záblesk v zrcadle B (toto zrcadlo se z jeho pohledu přibližuje k lampě).

**Shrnutí:** Světlo se ve vakuu pohybuje vůči všem pozorovatelům stejnou rychlostí 300 000 km/s. Tento fakt je velmi dobře experimentálně ověřen a musíme kvůli němu opustit mnoho našich představ o chování okolního světa.