

30. Základy speciální teorie relativity

Historie:

Z doby Galileia a Newtona si fyzikální svět zvykl na platnost zákonů, které vycházely z každodenní zkušenosti – čas plyne ve všech soustavách stejně, hmotnost tělesa nezávisí na volbě inerciální vztažné soustavy v níž ji měříme, stejně jako délka tělesa apod. Fyzika stála pevně na Newtonových zákonech. Roku 1887 prohlásil Gustav Robert Kirchhoff: „Celá fyzika je hotova. Zbývá vyřešit jen dva drobné problémy: konstantní rychlost šíření světla a odchylky od teorie záření černého tělesa.“

Pro vědce, kteří se zabývali optikou bylo přirozené považovat světlo za vlnění, které potřebuje ke svému šíření nějaké prostředí. Pro mechanické vlnění to bylo samozřejmé a tak když Maxwell elektromagnetické vlny předpověděl (1864) a Hertz objevil (1887), předpokládali vědci prostředí, jímž se tyto vlny šíří a nazvali je **ether**. Ten měl být jakousi univerzální vztažnou soustavou, vůči které by bylo možné vztahovat rychlost světla. Měl by mít například tyto vlastnosti:

- extrémně tuhý s ohledem na vysokou rychlost světla
- téměř nehmotný, aby nezpomaloval Zemi při jejím pohybu vpřed

Jestli se světlo pohybuje v takovém etheru, má tato teorie velmi závažné důsledky, které by se měly mimo jiné projevit v rychlosti světla měřené v soustavě, která se vůči zdroji světla pohybuje, a v soustavě, vůči které je zdroj světla v klidu.

Takovou soustavou je naše Země. Pokud je pro nás ve vztahu k rychlosti světla pomalá její rotace (cca 460 m/s – obvodová rychlost, jsme-li na rovníkū), můžeme vzít za vděk rychlostí jejího oběhu kolem Slunce (cca 30 000 m/s). Je-li ether onou nehybnou soustavou, vůči níž se světlo pohybuje, měla by se rychlost světla lišit při pohybu ve směru pohybu Země a kolmo k němu. Je-li totiž prostor vyplněn etherem, pohybujeme se jím spolu se zeměkoulí kolem Slunce výše uvedenou rychlostí 30 000m/s, pohybuje-li se i Slunce, je naše rychlost vůči etheru ještě větší. Z hlediska pozemského pozorovatele se pohybuje ether vzhledem k zeměkouli. Jedním z pokusů, které měly existenci nebo absenci etheru potvrdit nebo vyvrátit byl například pokus Michelsona a Morleyho (viz níže v poznámkách).

Teorie relativity spočívá na dvou postulátech

1. Ve všech inerciálních vztažných soustavách platí stejné fyzikální zákony.
2. Rychlost světla ve vakuu má ve všech inerciálních vztažných soustavách stejnou velikost, nezávisle na vzájemném pohybu světelného zdroje a pozorovatele.

Poznámka:

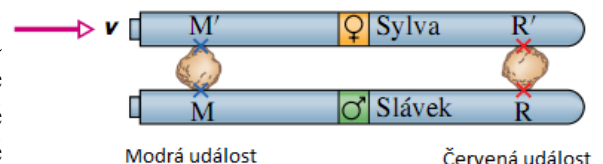
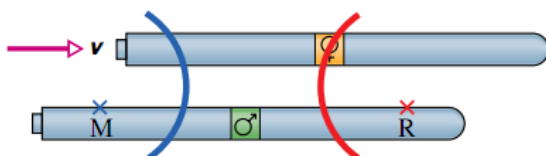
Postulát - tvrzení, které konstatuje fakt; nedokazuje se

Inerciální vztažné soustavy jsou takové, které se pohybují navzájem konstantní rychlostí.

Důsledky postulátů:

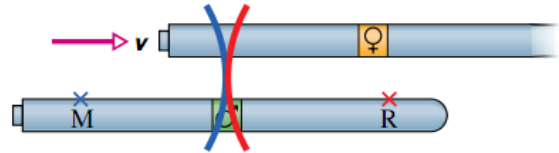
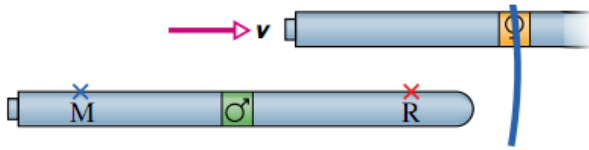
1. Relativita současnosti:

Dejme tomu, že v okamžiku, kdy se rakety Slávka a Sylvy míjejí, dojde k modré a červené události (exploze dvou meteoritů). Jelikož se obě rakety vůči sobě pohybují (viz obrázek), můžeme sledovat, kdy obě události zjistí Slávek a kdy Sylva:



Nyní je okamžik, kdy Sylva zjišťuje červenou událost, stala se tedy z jejího pohledu „ted“.

Nyní Slávek zjišťuje červenou i modrou událost:



V tomto okamžiku zjišťuje Sylva modrou událost.

Sylva: „K červené události došlo dřív a k modré později. Viděla jsem to.“

Slávek: „K oběma událostem došlo ve stejném okamžiku. Jsou současné.“

Kdo má pravdu? (Vlastně oba, každý ze své soustavy souřadnic.)

O dvou událostech můžeme říci, že jsou současné jen tehdy, když proběhnou také na stejném místě.

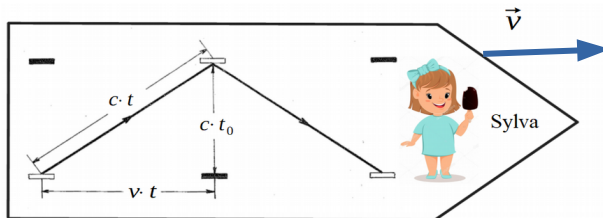
Poznámka: Výše uvedené tvrzení je snad lépe pochopitelné představíme-li si, že by se v zítřejším tisku objevila zpráva, že v Krabí mlhovině právě vybuchla obří supernova. Je celkem dobře představitelné, že tisk informuje o události několik milionů let staré. Jen světlu trvalo dlouho než dorazilo z Krabí mlhoviny k naší Zemi.

2. Dilatace času

Vzhledem ke konečné rychlosti světla jsme nuceni udělat další myšlenkový pokus. Představme si, že máme dvoje hodiny. Jsou velice zvláštní. Budou měřit čas pomocí světelného paprsku a nikoli ručičkami (tak, jak jsme zvyklí):



Tik hodin bude znamenat, že paprsek světla urazí dráhu od vysílače (dole) k přijímači (nahore). Hodiny synchronizujeme (půjdou stejně – budou ukazovat stejný čas). Hodiny H_1 budou na Zemi a jimi bude měřit Slávek, hodiny H_2 budou v nějaké raketě, kterou bude cestovat Sylva rychlostí v směrem vpravo:



Sylva je v raketě a proto bude pozorovat průběhu jednoho tiků jako $c \cdot t_0$. Slávek bude naproti tomu pozorovat průběhu tiků hodin jako $c \cdot t$. Jaký je vzájemný vztah mezi časem vnímaným Slávkem a Sylvou? K odvození vztahu použijeme Pythagorovu větu (patrná z obrázku) a vyjádření drah uražených paprskem světla. Po nutných úpravách nám vyjde vztah mezi oběma časy takto:

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

t_0 ... čas měřený Sylvou (Je to nejkratší možný čas, který lze naměřit. Jde o čas měřený tím, kdo se vůči hodinám H_1 nepohybuje.)

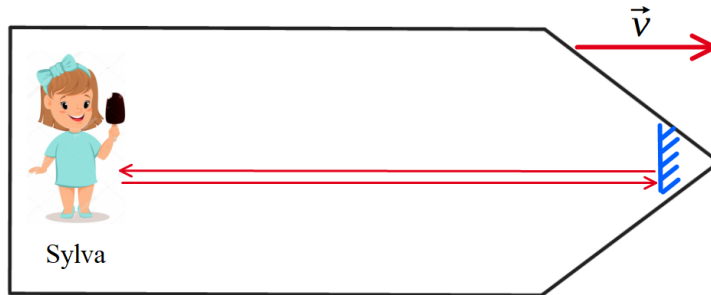
t ... čas změřený Slávkem (pozorovatelem, který se vůči hodinám H_1 pohybuje rychlostí v . Jeho čas

bude delší než t_0 !

Poznámka: Uvážíme-li situaci, kdy se Sylva s raketou pohybuje rychlostí $0,6c$. Pak, jestliže Sylva prožije v raketě jednu hodinu, tak prožije Slávek na zemi dobu 1 hodiny a 15 minut! (Stačí dosadit do vztahu).

3. Kontrakce délek

Uvážíme situaci, kdy Slávek sleduje Sylvu, která letí v raketě. Sylva si raketu přeměří světelným paprskem, který vysílá k jejímu začátku, kde je zrcátko. Tam se paprsek odrazí a vrátí se zpět k Sylvě. Stejné měření provádí Slávek.



Slávek

$$l = l_0 \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

l_0 ... délka rakety, kterou změří Sylva (je to nejmenší délka, kterou lze změřit; naměří ji pozorovatel, který je vůči měřené délce v klidu)

l ... délka, kterou naměří Slávek (je to délka, kterou naměří pozorovatel, vůči kterému se pozorovatel pohybuje)

Poznámka: Poletí-li Sylva v raketě rychlostí $0,8c$ v raketě délky 20 m, uvidí Slávek raketu délky 12 metrů (stačí dosadit do vztahu).

4. Další relativistické veličiny

A) Relativistická hmotnost:

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

m_0 ... klidová hmotnost (hmotnost pro pozorovatele, vůči kterému se objekt nepohybuje; kdybychom uvažovali měření hmotnosti rakety, které používá Sylva, pak by hmotnost m_0 naměřila Sylva, hmotnost m by naměřil Slávek)

B) Relativistická hybnost:

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

C) Relativistické skládání rychlostí:

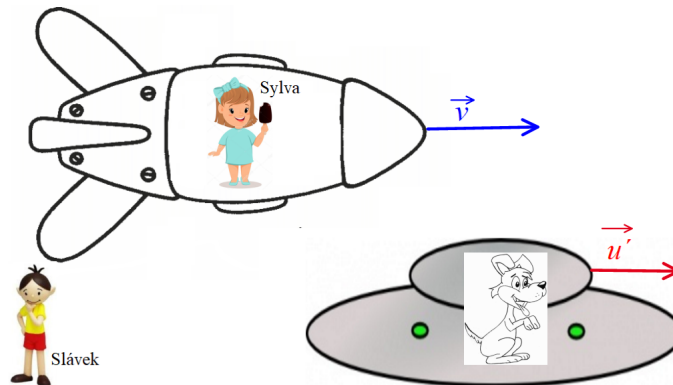
$$u = \frac{u' + v}{1 + \frac{u' \cdot v}{c^2}}$$

u ... rychlost pejska vůči Slávkovi

v ... rychlost Sylvy vůči Slávkovi

u' ... rychlost pejska vůči Sylvě

Situaci si lze představit takto: Slávek pošle Sylvu a pejska raketou do vesmíru. Pejsek se ale trochu nudí a zlobí. Sylva ho tedy pošle „na průzkum“ v malém modulu. Sylva se pohybuje vzhledem ke Slávkovi rychlostí v , pejsek se pohybuje vzhledem k Sylvě rychlostí u' . Rychlostí u se pohybuje pejsek vůči Slávkovi:



Obrázek neodpovídá tím, že všechny rychlosti (v , u i u') by měly být v jedné přímce.

D) Energie:

$$E = E_0 + E_k$$

$$E = m \cdot c^2 = \frac{m_0 \cdot c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

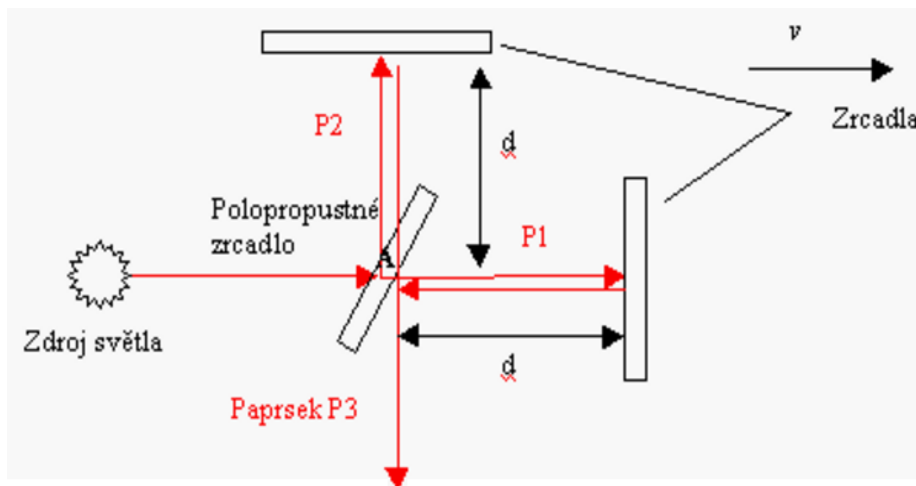
E ... celková energie

E_0 ... klidová energie (energie vůči pozorovateli, vzhledem

k němuž je objekt v klidu; v případě Slávka a Sylvy, která letí v raketě by byla E_0 energií vůči Sylvě, E by byla energie vůči Slávkovi)

E_k ... kinetická energie objektu

Takový pokus provedli Michelson a Morley roku 1887:



Pokus chtěl potvrdit existenci etheru. Byl je uspořádán tak, aby papřsek P1 měl směr shodný se směrem pohybu Země a P2 byl na něj kolmý. Oba papřsky vzniknou rozdělením polopropustným zrcadlem a P3 vznikne interferencí P1 a P2. Z výsledku interference pak lze vyčíst, zda P1 a P2 potřebovaly stejný nebo různý čas na uražení dráhy od polopropustného zrcátka až k detektoru papřsku P3 nebo stejný čas. Tím lze ukázat vliv oběhu Země na rychlost šíření světla. Jenomže Michelsonův pokus žádný takový rozdíl neukázal. Tím ovšem teorie etheru padla. Rychlost světla byla v obou směrech stejná.

Kdyby existoval klidný ether vyplňující celý prostor, mohli bychom k němu vztahovat každý pohyb. Z neexistence etheru však plyne, že neexistuje ani žádná univerzální vztahná soustava, takže existuje pohyb výhradně jen vůči pozorovateli nebo jeho přístroji.

Na tomto základním pokusu tedy teorie etheru ztroskotala. Ale co dál? Je-li pohyb relativní, je třeba nové teorie, která by s absolutní vztahnou soustavou nepočítala. Přichází tedy teorie relativity (speciální neuvažuje zrychlení soustav, obecná tyto situace zahrnuje).