

SPECIÁLNÍ TEORIE RELATIVITY

1. PROSTOR A ČAS V KLASICKÉ MECHANICE

Vztažná soustava – 4 souřadnice (kartézské) $xyz t$

Inerciální soustavy – jsou vůči sobě v klidu nebo jedna se vůči druhé pohybuje RPP. (platí v ní NPZ)

Neinerciální soustavy – jedna se vůči druhé pohybuje se zrychlením.

soumístné události – děje, které se odehrály ve VS na stejném místě

současné události – děje, které se odehrály ve VS ve stejném okamžiku

V klasické mechanice předpokládáme

- absolutní čas – ve všech VS plyne stejně rychle
- absolutní délku předmětů
- hmotnost tělesa je stálá
- **skládání rychlostí** – prostým součtem $u = u' + v$

Galileův mechanický princip relativity:

Žádným **mechanickým** pokusem nelze zjistit, zda se těleso pohybuje rovnoměrným přímočarým pohybem nebo je v klidu.

Nebo – Ve všech IVS platí stejné zákony klasické Newtonovy mechaniky. (platí do asi 0,3 rychlosti světla.)

Relativnost trajektorií - Příklad: Koncový bod vrtule letadla.

Soumístnost a současnost v dopadu

Skládání rychlostí

2. VZNIK STR

Problémy:

- 1) Může pozorovatel v IVS zjistit její rovnoměrný přímočarý pohyb pozorování nemechanických jevů?
- 2) Určení rychlosti světla.

Olaf Romer (přítel Newtona) - z astronomických pozorování zjistil, že se světlo šíří konečnou rychlostí

Christian Huygens – určil přibližnou hodnotu

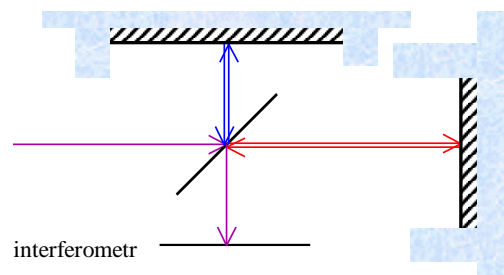
Hippolyte Louis Fizeau [fizó] 1819 – 1896

pozemská metoda měření rychlosti světla – (otáčející se ozubené kolo přerušovalo světelný paprsek, odraz od zrcadla cca 8 km vzdáleného, měřila se rychlost kola. (315 300 km/s) Nelze však určit rychlost v různých směrech.

Albert Abraham Michelson

Nobelova cena 1907 – spektroskopie

- Pokus měl zjistit absolutní pohyb Země vůči éteru
- Paprsky dopadající na stínítko jsou koherentní, vytvářejí interferenční obrazec.
- Otočením o 90° by se měly změnit, ale to se nestalo $\rightarrow c = \text{konst.}$
- nejužitečnější neúspěšný experiment



3. ZÁKLADNÍ PRINCIPY STR

Einsteinovy postuláty:

1) princip relativity

Žádným pokusem nelze zjistit, zda se těleso pohybuje rovnoměrným přímočarým pohybem nebo je v klidu. Neexistuje absolutní pohyb, absolutní klid ani světelný éter.

2) princip stálé rychlosti světla

Ve všech IVS má rychlost světla ve vakuu stejnou velikost, nezávisle na vzájemném pohybu světelného zdroje a pozorovatele. (dokázáno Michelsonovým pokusem)

DŮSLEDKY:

4. RELATIVNOST SOUČASNOSTI

Podle KF je současnost absolutní

Díky $c = \text{konst.} \rightarrow$ současnost je relativní

„Podivné“ výsledky jsou „podivné“ pouze proto, že neodpovídají naší zkušenosti.

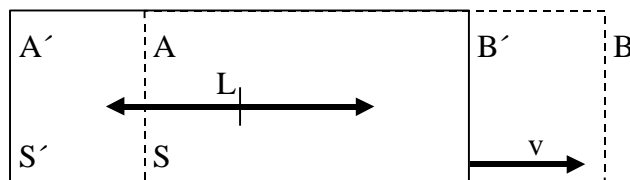
Einsteinova definice současnosti

Dvě nesoumítné události v bodech A a B jsou současné, jestliže světelné paprsky vyslané z těchto bodů v okamžiku vzniku obou událostí, dorazí do bodu P stejně vzdáleného od bodu A a B současně.

S – soustava spojená se zemí

S' – vlak jedoucí rychlostí blízkou rychlosti světla ($v \rightarrow c$).

Vlak má dvě stěny A a B a přesně uprostřed mezi nimi je lampa. V určitém okamžiku, lampa zableskne.



Pozorovatel

- ve vlaku – v soustavě S' vidí, že světlo dopadne na obě stěny ve stejný okamžik
- na zemi – v soustavě S uvidí, že světlo dopadne dříve na stěnu A.

To se stane, protože se světlo šíří ve všech soustavách všemi směry stejně rychle a zároveň protože vlak už popojel.

Současnost dvou nesoumítných událostí je relativní.

Dvě nesoumítné události, které jsou současné vzhledem k soustavě S' nejsou současné vzhledem k soustavě S. (toto platí, pouze pokud neleží obě události v rovině kolmé ke směru pohybu. Pak je současnost těchto událostí absolutní.)

Lorentzova transformace (matematické vyjádření vztahů mezi oběma soustavami)

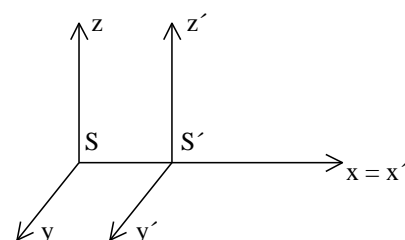
5. DILATACE (prodlužování) ČASU

světelné hodiny – myšlenkový model

(rovnoběžná zrcadla ve vzdálenosti $l = c \cdot \Delta t$, mezi nimiž se periodicky odráží světelný paprsek)

- V soustavě S jsou hodiny H.
- V soustavě S' jsou stejné hodiny H'.
- V bodech P a P' jsou pozorovatelé.
- V čase $\Delta t = 0$ splývají P a P' v jeden bod.
- Hodiny jsou spuštěny ve stejný okamžik a soustava S' se začne pohybovat rychlostí v .

Za čas Δt urazí soustava S', hodiny a pozorovatel P' vzdálenost $v \cdot \Delta t$.



- V soustavě S za čas Δt doletí světlo nahoru k zrcadlu, které je ve vzdálenosti $c \cdot \Delta t$. Pozorovatel P vidí, jak letí světlo v hodinách H' .
- Světlo **se šíří všemi směry stejně rychle**, a tak když letí v soustavě S' svisle vzhůru, jeví se to v soustavě S, jako by letělo šikmo po úsečce PM.
- Za čas Δt doletí do bodu M.
- V soustavě S' se tento pohyb jeví jako pohyb na vzdálenost $P'M = c \cdot \Delta t'$.

Hodiny H' pohybující se vzhledem k pozorovateli jdou pomaleji než hodiny H, které jsou vzhledem k tomuto pozorovateli v klidu.

Odvození vztahu mezi Δt a $\Delta t'$:

$$\begin{aligned} |PM| &= c \cdot \Delta t \\ |PP'| &= v \cdot \Delta t \\ |P'M| &= c \cdot \Delta t' \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} |PM| &> |P'M| \\ c \cdot \Delta t &> c \cdot \Delta t' \\ \Delta t &> \Delta t' \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} |PM|^2 &= |PP'|^2 + |P'M|^2 \\ c^2 \cdot \Delta t^2 &= v^2 \cdot \Delta t^2 + c^2 \cdot \Delta t'^2 \end{aligned}$$

$$\Delta t^2 = \frac{c^2}{c^2 - v^2} \Delta t'^2$$

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

6. KONTRAKCE (zkracování) DÉLEK

Př.: Tyč v pohybu se soustavě S' .

- pozorovatel v K vyznačí na ose x okamžité polohy koncových bodů (současně)
- nejsou však současné pro pozorovatele v K'
- délka předmětů je také relativní – vzhledem ke vztažené soustavě

Měříme-li délku tyče pomocí světla (od jednoho konce vyšleme paprsek, na druhém se odrazí od zrcadla a letí zpět) měříme čas, za který tuto vzdálenost uletí, musíme počítat s rychlostí pohybu tyče.

Odvození vztahu pro kontrakci

V K' je tyč vůči pozorovateli v klidu. Světlo urazí vzdálenost $O'Z'$ za čas:

$$t' = \frac{2 \cdot l_0}{c}$$

V K Pozorovatel na Zemi uvidí, že vlak pokaždé popojede a světlo urazí vzdálenosti:

- k zrcátku $c \cdot t_1 = v \cdot t_1 + l$
- zpět na začátek tyče: $c \cdot t_2 = l - v \cdot t_2$

$$t_1 = \frac{l}{c - v}$$

$$t_2 = \frac{l}{c + v}$$

$$t = t_1 + t_2 = \frac{l}{c - v} + \frac{l}{c + v} = \frac{2 \cdot l \cdot c}{c^2 - v^2}$$

Mezi t a t' je dilatační vztah:

$$t = \frac{t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Kontrakce délek

Délka tyče l v soustavě, vzhledem k níž se tyč pohybuje rychlostí v , je vždy menší, než délka tyče l_0 v soustavě klidové.
(l_0 – **klidová** (skutečná...) **délka** tyče)

Rozměry tělesa kolmé k vektoru rychlosti se nezkracují.

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

$$\begin{aligned} 0 &< \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} < 1 \\ l &< l_0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{2 \cdot l \cdot c}{c^2 - v^2} &= \frac{2 \cdot l_0}{c} \\ \frac{2 \cdot l \cdot c}{c^2 - v^2} &= \frac{2 \cdot l_0}{c} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \\ 2 \cdot l \cdot c \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} &= \frac{2 \cdot l_0}{c} \cdot c^2 \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) \\ l \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} &= l_0 \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) \dots \dots \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \\ l \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) &= l_0 \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \end{aligned}$$

7. SKLÁDÁNÍ RYCHLOSTÍ VE STR

- S se pohybuje vůči S rychlostí v
- v S se pohybuje částice rychlostí u'
- v S se pohybuje částice rychlostí $u = u' + v$ (klasicky)

Pokud $u' \rightarrow c$, pak je výsledek v rozporu s principy

Proto Einstein odvodil vztah pro skládání rychlostí, který už druhému postulátu o stálé rychlosti vyhovuje:

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

- relativistický vztah pro skládání rychlostí

8. RELATIVISTICKÁ DYNAMIKA

RELATIVISTICKÁ HMOTNOST

- v klasické fyzice – hmotnost je konstantní nezávislá na v
- v relativistické fyzice – hmotnost tělesa se s jeho rostoucí rychlostí zvětšuje
Pro $v \rightarrow c$ pak platí $m \rightarrow \infty$.

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

m_0 – klidová hmotnost (v soustavě K')

m – relativistická hmotnost

Z tohoto vztahu vyplývá, proč těleso nemůže dosáhnout rychlosti světla. To proto, že působí-li na něj síla, s rostoucí rychlostí roste i jeho hmotnost. Pro $v \rightarrow c$ jde $m \rightarrow \infty$, a proto podle 2. Newtonova zákona $a \rightarrow 0$.

Zákon zachování hmotnosti

úhrnná relativistická hmotnost izolované soustavy těles zůstává při všech dějích probíhajících v této soustavě konstantní.

- urychlovače částic
- urychlovače elektronů (USA Stanford)
- (až $40\,000 \cdot m_0$)

RELATIVISTICKÁ HYBNOST

Relativistický zákon zachování hybnosti :

Celková hybnost izolované soustavy těles zůstává u všech dějů probíhajících uvnitř soustavy konstantní. (patří mezi nejobecnější fyzikální zákony).

ZZ rel. hmotnosti a ZZ rel. hybnosti platí ve všech IVS. Ověřeno srážkami částic.

9. VZTAH MEZI ENERGIÍ A HMOTNOSTÍ

- Klasická mechanika nemá žádný obecný vztah mezi energií a hmotností.
- Těleso může mít E_k , E_p , U , m je stálé

Albert Einstein dokázal, že při každé změně celkové energie soustavy se mění také její hmotnost:

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2$$

Tento vztah je nejvýznamnější výsledek STR.

Vzhledem k velké rychlosti světla odpovídá velké změně energie jen malá změna hmotnosti.

Je využíván při

- jaderných reakcích v reaktorech elektráren
- vývoji atomových a termonukleárních bomb a při jejich testech i experimentálně ověřen
- má velký význam v astrofyzice (původ sluneční energie, energie hvězd)

Celková energie soustavy se rovná součtu

$$E = E_0 + E_k \quad E = m \cdot c^2$$

- klidové energie $E_0 = m_0 \cdot c^2$
- kinetické energie E_k .

Zákon zachování energie:

Celková energie izolované soustavy zůstává při všech dějích probíhajících uvnitř soustavy konstantní.