Pole a éter

Pro fyzika 19. století neexistovalo pole – jen substance a změny její polohy v prostoru
pole původně jen berlička $\rightarrow$ postupně substanci zastínilo

Maxwell – pole je vytvářeno el. nábojem

Světlo má vlastnosti vlnění (interference, ohyb, aj.) podobně jako např. zvuk.
Mech. vlnění potřebuje ke svému šíření určitý druh prostředí.
Huygens: Světlo je vlnění zvláštního nehmotného, průhledného a vše prostupujícího prostředí – světelného éteru, kterým se světlo šíří podobně jako zvuková vlna vodou.
Pole bylo původně chápáno jako vlastnost éteru. Slovo éter postupně znamenalo jen vlastnost prostoru přenášet elm. vlnění.

Souřadnicové soustavy (SS)

Zákony klas. transformace souřadnic a rychlostí $x = x' + vt$ $u = u' + v$

Pravidla:

1. Neznáme pravidlo, jak najít inerciální soustavu. Je-li však inerciální soustava dána, pak jich můžeme nalézt nekonečný počet, neboť všechny SS, které se pohybují relativně k sobě rovnoměrně, jsou soustavami inerciálními, jestliže jedna z nich je inerciální.
2. Čas, který odpovídá nějaké události, je ve všech SS tentýž. Souřadnice a rychlost se mění podle transformačních zákonů.
3. Síla a Δv a tedy i zákony mechaniky jsou invariantní.

Éter a pohyb

Zvuk, dva pozorovatelé a vagón:
- ve vagóně je zdroj zvuku
uvnitř vagónu: rychlost zvuku je ve všech směrech stejná
vně vagónu: rychlost zvuku je větší ve směru pohybu vagónu, menší ve směru opačném
Vagón unáší s sebou prostředí.

Způsob, jak nic neslyšet, když někdo mluví, je vzdalovat se nadzvukovou rychlostí.

Světlo a éter. Je éter unášen vagónem?
Jsou dvě možnosti: a) éter je unášen vagónem jako vzduch
b) vagón brázdí éter jako loď oceán
- uvažujeme a): platí transformační zákony $\Rightarrow$ pozorovatelé vně naměří větší rychlost světla, blíží-li se vagón k němu a menší, vzdaluje-li se
„Kdyby naše rychlost byla větší než rychlost světla, mohli bychom světelný signál předběhnout. Mohli bychom vidět události v minulosti, kdybychom dostihli světelné vlny

dříve vyslané. Zachycovali bychom je v obráceném pořadí a řetěz událostí na naší Zemi by se jevil jako film promítaný pozpátku.“ $\leftarrow$ neprokázalo se

$\Rightarrow$ rychlost světla je ve všech SS stejná, nezávisle na tom, zda a jak se světelný zdroj pohybuje.

Nesmí se předpokládat, že pohybující se těleso unáší s sebou éter.

Musíme uvažovat b) : existuje éterové moře

$\Rightarrow \exists$ jedna SS vůči éteru v klidu $\rightarrow$ v ní musí platit jiné fyzikální zákony, to ale odporuje Galileou principu relativity (vlastně existuje absolutní, a ne jen relativní pohyb).

Vzdáme se G. principu relativity: všechna tělesa se pohybují klidným éterovým mořem.

<u>Pozorovatel vně</u> (privilegovaný = spojený s éterem):
je v SS, v níž c je stále stejná, „normální“ ve všech směrech

<u>Pozorovatel uvnitř</u>:
c menší ve směru pohybu (přední stěna uniká v éteru, bude dostižena později, v případě, že se vagón pohybuje také rychlostí c, světlo ji nedostihne nikdy.
c větší proti směru pohybu vagónu

$\Rightarrow$ jen v soustavě éteru je c ve všech směrech stejná

Země je dobrá soustava ubíhající vhodnou rychlostí kolem Slunce.
K potvrzení výše uvedených tvrzení měl posloužit Michelsonův - Morleyho pokus - jeho výsledek = trest smrti pro éter

I zkoumání varianty něco mezi a) b) nevedlo nikam!

Vznik speciální teorie relativity

2 základní principy STR:
1) Princip relativity: ve všech IS platí stejné fyzikální zákony
2) Princip konstantní rychlosti světla ve všech IS

Základy speciální teorie relativity

STR-Albert Einstein

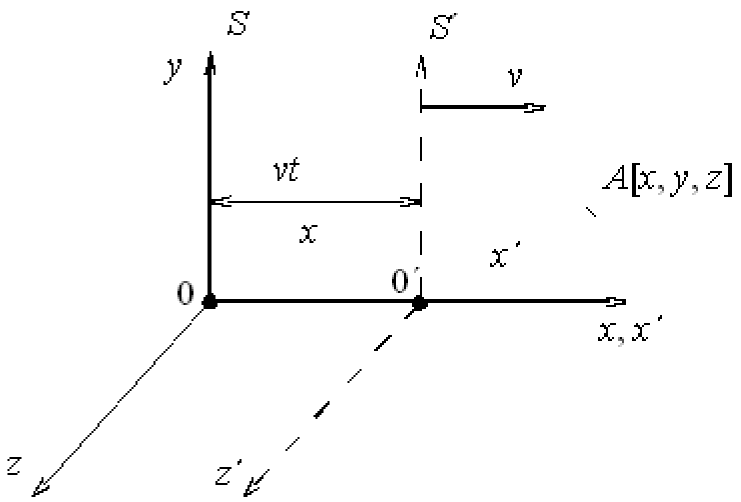
Einstein: „Vytvořit teorii neznamená zbořit starou chalupu a vystavět místo ní mrakodrap. Spíše bychom to mohli srovnat s výstupem na horu, kde se nám otvírají nové a širší pohledy, které nám odhalují neočekávané souvislosti mezi bodem, odkud jsme vyšli, a nově objeveným okolím. Bod, z něhož jsme vyšli, existuje stále a můžeme jej vidět, i když se zdá menší a zabírá jenom nepatrnou část našeho zorného pole, které se před námi rozevřelo, když jsme překonali všechny překážky dobrodružného výstupu.“

Prostor a čas v klasické Newtonovské mechanice

- polohu tělesa určujeme vždy k vztažné soustavě *x*, *y*, *z*, *t*
- události soumístné
- události současné (v klas. mech. platí absolutní současnost)

Galileiho transformace

$x = x' + vt$
$y = y'$
$z = z'$
$t = t'$
$u = v + u'$



Galileiho princip relativity: Všechny inerciální soustavy jsou z hlediska zákonů mechaniky úplně rovnocenné.

Příklady:

1. Liška prohání zajíce. Počáteční vzdálenost mezi nimi je *l*. Liška běží rychlostí *u*, zajíc rychlostí *v* (nekličkují, ale běží rovně). a) Za jak dlouho doběhne liška zajíce? b) Za jakou dobu by se setkali, kdyby běželi proti sobě?

Řešení:

a) Vyjdeme z rovnice

$$u \cdot t = l + vt$$

$$\boxed{t = \frac{l}{u - v}}$$

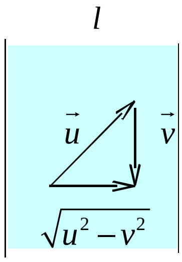
b) Vyjdeme z rovnice

$$ut + vt = l$$

$$\boxed{t = \frac{l}{u+v}}$$

2. Rychlost kajakáře vzhledem ke stojaté vodě má velikost $u = 3\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$. Za jakou dobu dopluje tento kajakář z jednoho břehu řeky na druhý břeh a zpět, je-li šířka řeky $l = 40$ m, velikost rychlosti vody v řece vzhledem k břehům je $v = 1\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$ a pádluje-li kajakář tak, aby se pohyboval stále kolmo na směr toku řeky?

Řešení:
$l = 40$ m
$u = 3\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$
$v = 1\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$
$t = ?$



Z obrázku plyne

$$t = \frac{2l}{\sqrt{u^2 - v^2}} = 29\,\mathrm{s}$$

Kajakář dopluje z jednoho břehu na druhý a zpět za dobu 29 s.

3. Motorový člun se pohybuje přímočaře rovnoměrně mezi dvěma bójemi umístěnými podél toku řeky. Vzhledem k vodě v řece se pohybuje člun rychlostí o velikosti $u = 60\ \mathrm{km \cdot h^{-1}}$. Voda teče rychlostí o velikosti $v = 10\ \mathrm{km \cdot h^{-1}}$. Vzdálenost mezi dvěma bójemi je $l = 10$ km. Za jakou dobu propluje člun od jedné bóje k druhé i zpět?

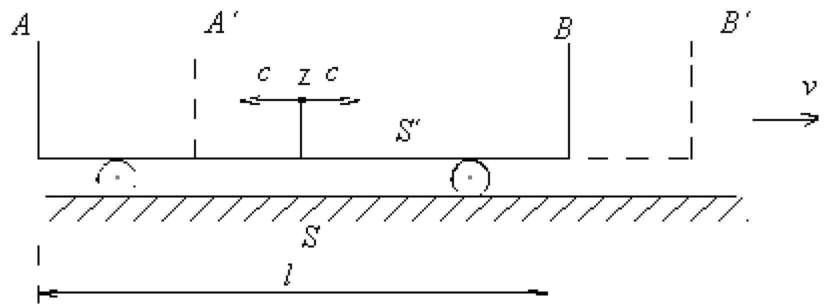
Řešení:
$l = 10$ km
$u = 60\ \mathrm{km \cdot h^{-1}}$
$v = 10\ \mathrm{km \cdot h^{-1}}$
$t = ?$

$$t = t_1 + t_2 = \frac{l}{u+v} + \frac{l}{u-v} = \frac{2lu}{u^2 - v^2} = 0{,}34\,\mathrm{h}$$

Člun propluje od jedné bóje k druhé i zpět za dobu 0,34 h.

Relativnost současnosti

- princip konstantní rychlosti světla vede k relativitě současnosti



- vztažná soustava *S* je přímá trať, soustava *S´* je železniční vagón jedoucí rovnoměrně přímočaře po trati rychlostí *v*. Uprostřed vagónu je lampa *Z* a na obou koncích vagónu jsou rovinná zrcadla *A* a *B*. V určitém okamžiku signální lampa zableskne. Pozorovatel v soustavě vagonu zjistí, že signál dopadne na obě zrcadla současně.
- V soustavě *S* pozorovatel zjistí, že signály nedopadnou na obě zrcadla současně. Světlo se v jeho soustavě, stejně jako v soustavě vagónu, šíří rychlostí *c*. Zrcadlo *A* se však během šíření světelného signálu posunulo z místa *A* do místa *A´*, kdežto zrcadlo *B* se vzdálilo do místa *B´*(dále od zdroje). Z toho plyne, že pro pozorovatele na trati světlo dopadne na zrcadlo *A* dříve než na zrcadlo *B*.

Kvantitativně:

V *S´* dopadne světlo na *A* a *B* současně,

v *S* dopadne světlo na *A* za čas t_1

$$ct_1 = l - vt_1 = \boxed{t_1 = \frac{l}{c+v}},$$

v *S* dopadne světlo na *B* za čas t_2

$$ct_2 = l + vt_2 = \boxed{t_2 = \frac{l}{c-v}}.$$

$\Rightarrow$ Současnost dvou událostí je relativní. Současné mohou být v obou soustavách jen ty události, které jsou v obou soustavách soumístné.

Závěr: **Relativnost současnosti znamená, že dvě nesoumístné události, které jsou současné v jedné inerciální soustavě, nebudou současné v jiné vztažné soustavě. Každá vztažná soustava má „své“ chápání současnosti, a tedy „své“ chápání synchronizace hodin umístěných na různých místech.**

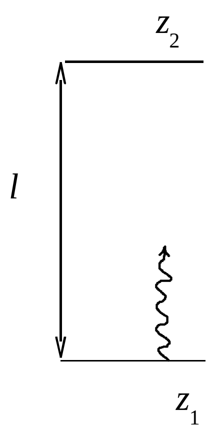
Synchronizace hodin a dilatace času

<u>Synchronizace</u>: Jedny hodiny budou referenční. Do středu mezi ref. hodiny a další hodiny umístíme světelný zdroj – při dopadu světla na obou hodinách bude stejný čas ⇒ každá dvojice synchron. hodin je synchronizována i vzájemně. hodiny: zařízení konající periodický děj.

<u>Dilatace času</u>: Hodiny, které se pohybují vzhledem k vztažné soustavě, zpomalují svůj chod vzhledem k hodinám synchronizovaných v této soustavě.

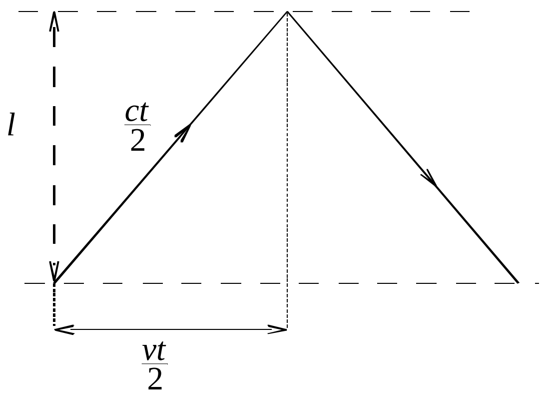
<u>Vysvětlení dilatace času pomocí Einsteinových světelných hodin</u>:
Dvě zrcadla vzdálená o délku *l*. Při dopadu světelného impulsu na zrcadlo vznikne el. signál (tik).

Soustava S´:
Z_1 , Z_2 - zrcadla



Doba mezi dvěma el. signály (tiky) je $\boxed{\triangle t_0 = \frac{2l}{c}}$

pro pozorovatele v *S:*



$$\left(\frac{c\triangle t}{2}\right)^2 = l^2 + \left(\frac{v\triangle t}{2}\right)^2$$

$$\frac{\triangle t\sqrt{c^2 - v^2}}{2} = l$$

$$\triangle t = \frac{2l}{c}\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$ $\Rightarrow$ doba mezi dvěma signály v soustavě S je $\boxed{\triangle t = \frac{\triangle t_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}}$

$$\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} < 1$$

$$\Rightarrow \triangle t > \triangle t_0$$

Výše uvedené vztahy platí pro hodiny jakékoliv konstrukce a pro všechny procesy (biologické, chemické aj.).

Aplikace dilatace času - ve fyzice elementárních částic - doba života nestabilních částic závisí na tom, jak rychle se tyto částice pohybují.

Příklad:
Raketa se vzdaluje od sluneční soustavy rychlostí o velikosti 0,98*c*. Pozorovatel z rakety sleduje Zemi obíhající kolem Slunce. Jaká je pro pozorovatele doba jednoho oběhu Země kolem Slunce?

Řešení:

$$\triangle t = \frac{\triangle t_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} = \frac{\triangle t_0}{\sqrt{1-0,98^2}}$$

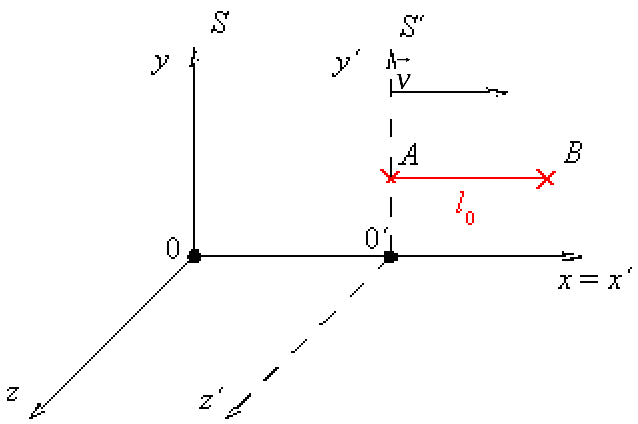
$$\sqrt{1-(1-0,02)^2} = \sqrt{1-(1-0,04+0,0004)} = \sqrt{0,04} = 0,2$$

$$\triangle t = 5\triangle t_0 = 5\,\text{roků}$$

Doba oběhu Země kolem Slunce je pro pozorovatele v raketě 5 roků.

Kontrakce délek

2 vztažné soustavy S a S', soustava S' se vzhledem k S pohybuje rychlostí $\vec{v}$ ve směru osy x. V soustavě S' leží ve směru osy x' tyč o délce l_0. Vzhledem k soustavě S' je tyč v klidu.



V soustavě S' se tyč změří pohodlně ($l_0 = x_2' - x_1'$) a ani nemusíme měřit obě souřadnice najednou.
V soustavě S je tento problém složitější, polohu konců musíme změřit současně (co je však současné v S není v současné v S').

<u>Myšlenkový pokus</u>: v $t = 0$ … soustavy S a S' splývají.
Tyč má v bodech A a B zrcadla. Z A vyšleme signál ten dopadne na B a vrátí se.

tento děj trvá:

$$\left.\begin{array}{l} \text{v } S' \ \ldots \ \triangle t_0 = \dfrac{2l_0}{c} \\ \text{v } S \ \ldots \ \triangle t \end{array}\right\} \quad \triangle t = \frac{\triangle t_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c}}}$$

v S … od A k B $\quad ct_1 = l + vt_1$

zpět $\quad ct_2 = l - vt_2$

$$\triangle t = t_1 + t_2 = \frac{l}{c-v} + \frac{l}{c+v} = \frac{2lc}{c^2 - v^2} = \frac{2l}{c}\frac{1}{1-\frac{v^2}{c^2}}$$

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

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

V soustavě S, vzhledem k níž se tyč pohybuje, naměříme její délku kratší než v soustavě S', vzhledem k níž je tyč v klidu.

Relativistické skládání rychlostí

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

v … velikost rychlosti soustavy S' vzhledem k S v kladném směru osy x

u' … velikost rychlosti tělesa, vzhledem k S' v kladném směru osy x

u … velikost rychlosti tělesa vzhledem k S

$$u < u' + v$$

Relativistická dynamika

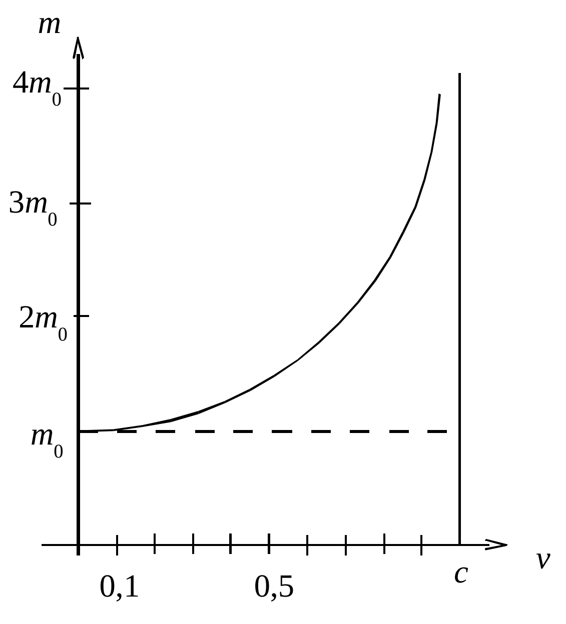
$F = m \cdot a$ … rychlost při konst. hmotnosti by mohla narůstat do nekonečna, to nelze.

<u>Hmotnost</u>

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

m_0 … klidová hmotnost

Graf závislosti hmotnosti tělesa na jeho rychlosti:



<u>Zákon zachování hmotnosti:</u>
Celková relativistická hmotnost izolované soustavy těles (hmotných bodů) zůstává při všech dějích probíhajících uvnitř této soustavy konstantní.

<u>Hybnost</u>

$$\vec{p} = m_0 \vec{v}$$

$$\vec{F} = \frac{\triangle \vec{p}}{\triangle t} \qquad \dots \text{ Newtonovsky}$$

$$\vec{p} = \frac{m_0 \vec{v}}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \qquad \dots \text{ relativisticky}$$

<u>Zákon zachování hybnosti</u>
Celková relativistická hybnost izolované soustavy těles (hmotných bodů) se při dějích probíhajících uvnitř soustavy nemění.

Relativistická energie

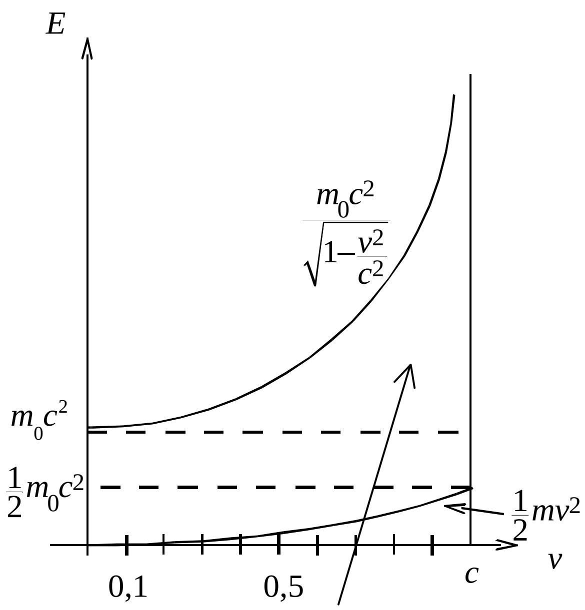
Podle STR odpovídá každé změně celkové energie $\triangle E$ soustavy změna hmotnosti soustavy $\triangle m$.

$$\boxed{\triangle E = \triangle m \cdot c^2}$$

- bez ohledu na způsob změny energie

V STR platí pro celkovou energii E soustavy vztah:

$$\boxed{E = mc^2}$$



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

$$m_0 c^2 = E_0$$

$$E = \frac{E_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

$E = E_0 + E_k$ … součet klidové a kinetické energie

K dosažení rychlosti c, bychom museli dodat nekonečně velkou energii.

Zákon zachování energie:
Celková energie izolované soustavy těles (hmotných bodů) zůstává při všech dějích probíhajících uvnitř izolované soustavy konstantní.