



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Úvod do speciální teorie relativity

Ing. Stanislav Jakoubek

Přehled studijních materiálů

Číslo DUMu	Název DUMu
<u>III/2-1-3-17</u>	<u>Klasický a relativistický princip relativity</u>
<u>III/2-1-3-18</u>	<u>Relativnost současnosti</u>
<u>III/2-1-3-19</u>	<u>Základy relativistické kinematiky</u>
<u>III/2-1-3-20</u>	<u>Základy relativistické dynamiky</u>



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Klasický a relativistický princip relativity

Název školy	Střední škola technická AGC a.s.
Název a číslo OP	OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost, CZ. 1.5 Název projektu: Výuka atraktivně a efektivně, č.p.: CZ.1.07/1.5.00/34.0057
Název šablony klíčové aktivity	III/2 Zvyšování kvality výuky prostřednictvím ICT
Tematická oblast (předmět)	Fyzika
Název sady vzdělávacích materiálů	Vybrané partie z fyziky pro IV. ročník středních technických škol
Jméno tvůrce vzdělávací sady	Ing. Stanislav Jakoubek
Číslo sady	III/2-1-3
Číslo DUMu	III/2-1-3-17
Anotace	V předloženém DUMu si nejprve připomeneme, jak chápe klasická fyzika pojmy prostor, čas, hmotnost atd. Poté zmíníme neúspěšné snahy fyziků na přelomu 19. a 20. století nalézt absolutní vztažnou soustavu. Na závěr se dozvíme, jak neúspěšných pokusů využil Albert Einstein k formulaci postulátů speciální teorie relativity.

Vtip na úvod

- ▶ Potká student ve vlaku Alberta Einsteina a ptá se ho: „Promiňte, pane profesore, zastavuje u tohoto vlaku New York?“

Nám známé fyzikální pojmy

- ▶ Prostor
- ▶ Čas
- ▶ Vztažná soustava
- ▶ Pohyb
- ▶ Hmotnost
- ▶ Rychlost
- ▶ Energie

Nám známé poznatky

- ▶ Každý pozorovaný pohyb nebo klid jsou relativní vzhledem k vztažné soustavě, kterou považujeme za klidnou
- ▶ Trajektorie hmotného bodu je relativní
- ▶ Z kinematického hlediska je lhostejné, která tělesa zvolíme za vztažnou soustavu

Poznatky – pokračování

- ▶ Z dynamického hlediska uvažujeme soustavy inerciální (platí v nich Newtonovy pohybové zákony a které se pohybují rovnoměrně přímočaře vzhledem k heliocentrické soustavě a tedy i vůči sobě navzájem)
- ▶ Inerciálních soustav je nekonečně mnoho a všechny jsou rovnoprávné
- ▶ Dynamické zákony pohybů jsou ve všech inerciálních soustavách stejné

Mechanický princip relativity

- ▶ = klasický = Galileův princip relativity
- ▶ Ve všech inerciálních soustavách probíhají fyzikální děje stejně a žádným mechanickým způsobem nelze dokázat, zda se soustava pohybuje rovnoměrně přímočaře (a jakou rychlostí), či zda je v klidu. Neexistuje absolutní soustava, ani absolutní pohyb a absolutní klid.

Důsledky

- ▶ Mezi prostorem a časem není v klasické fyzice žádný vztah
- ▶ Délka tyče se naměří kdekoliv a kdykoliv stejná
- ▶ Stejná doba trvání určitého děje
- ▶ Stejná hmotnost tělesa
- ▶ ...
- ▶ ... ať jsou v relativním klidu nebo v rovnoměrném přímočarém pohybu.

Snaha dokázat absolutní pohyb

- ▶ Přelom 19. a 20. století – snaha experimentálně dokázat existenci absolutního pohybu a absolutní vztažné soustavy pomocí jiných, než mech. pokusů (např. optických)
- ▶ Všechny tyto pokusy měly negativní výsledek
- ▶ Někteří fyzikové se snažili vysvětlit negativní výsledky pokusů – neúspěšně

Jiný přístup A. Einsteina

- ▶ Nesnažil se vysvětlit neúspěch pokusů, ale bral jejich výsledky jako experimentální fakt (tedy že absolutní vztažná soustava a absolutní pohyb a klid opravdu neexistují)
- ▶ Na základě úvah o prostoru a čase rozšířil platnost mechanického principu relativity na všechny fyzikální děje
- ▶ Zavedl dva na sobě nezávislé základní principy

Speciální princip relativity

- ▶ 1. Einsteinův postulát
- ▶ Všechny inerciální vztažné soustavy jsou rovnoprávné a pro popis fyzikálních dějů rovnocenné. **Žádnými pokusy** (nejen mechanickými) prováděnými uvnitř soustavy nelze zjistit, zda je daná soustava v klidu nebo v rovnoměrném přímočarém pohybu.

Princip stálé rychlosti světla

- ▶ 2. Einsteinův postulát
- ▶ Ve všech inerciálních soustavách má rychlost c šíření světla ve vakuu stejnou velikost, a to ve všech směrech a nezávisle na vzájemném pohybu světelného zdroje a pozorovatele.

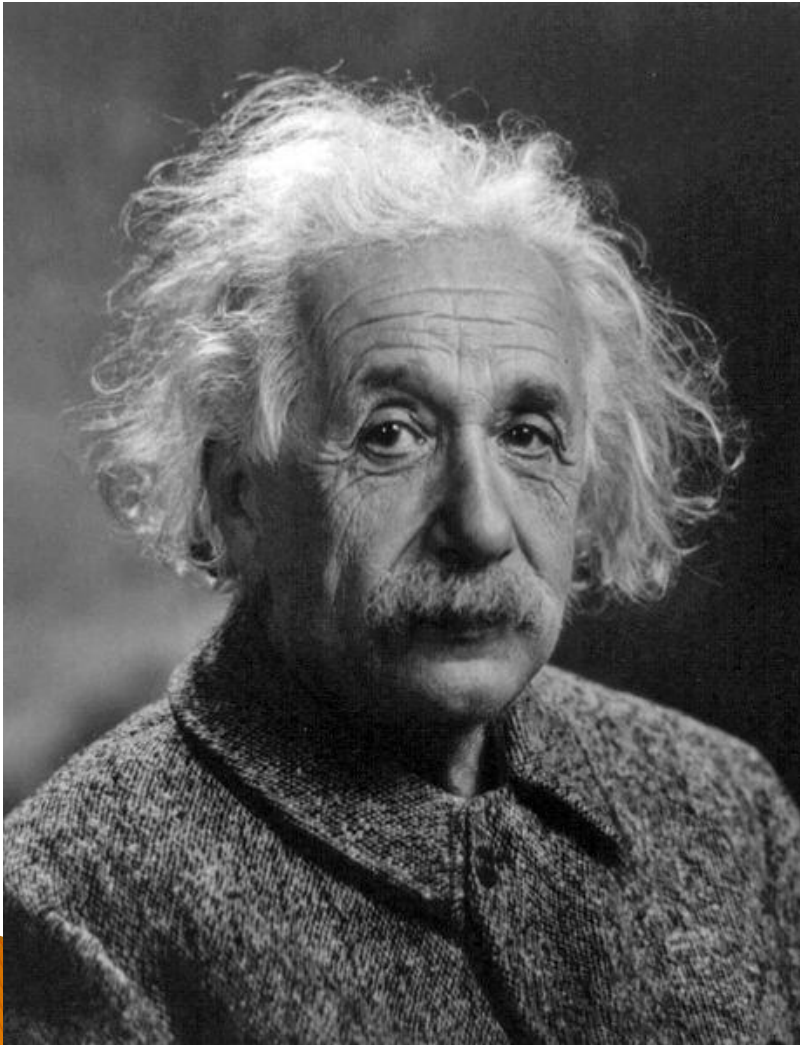
Poznámky

- ▶ Prostor, čas a pohyb jsou podle Einsteina relativní
- ▶ Tím pádem jsou všechna prostorová a časová měření relativní
- ▶ Rozdíly mezi klasickou a relativistickou fyzikou se většinou projevují při velmi vysokých rychlostech
- ▶ STR byla experimentálně dokázána (včetně většiny důsledků)

Poznámky – pokračování

- ▶ S poznatky STR je nutno počítat i při „neexotických“ podmínkách a pokusech – například navigace GPS by bez zahrnutí relativity nebyla použitelná
- ▶ Existuje i obecná teorie relativity (OTR), rovněž od Einsteina – je to teorie gravitace

Albert Einstein (1879–1955)



- 1905 – STR
- 1915 – OTR
- 1911–1912 –
pobýval a
pracoval v
Praze
- 1921 –
Nobelova cena
za vysvětlení
fotoefektu a za
zásluh o

Příklad

- ▶ Kosmonaut v kosmické lodi letící rychlostí $v=0,75c$ vzhledem k Zemi vysílá světelné signály z bodového zdroje. Jaký tvar vlnoploch zjistí pozorovatel v kosmické lodi a pozorovatel na Zemi?
- ▶ Z 2. Einsteinova postulátu plyne, že v obou případech jsou kulové.

Příklad

- ▶ Kosmonaut v kosmické lodi vzdalující se od Země rychlostí $v=0,2c$ vyšle směrem k Zemi světelný signál. Jaká je rychlost signálu a) vzhledem k Zemi, b) vzhledem ke kosmické lodi?
- ▶ Díky 2. Einsteinovu postulátu je v obou případech stejná a je to c .

Literatura

- ▶ [1] BEDNAŘÍK, Milan et al. *Fyzika IV pro studijní obory středních odborných učilišť*. 2. vyd. Praha: SPN, 1989. 212 s. Učebnice pro střední školy.
- ▶ [2] TURNER, Oren Jack. *wikipedia.cz* [online]. [cit. 26.3.2013]. Dostupný na WWW: http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Albert_Einstein_Head.jpg
- ▶ [3] BARTÁK, František a kol. *Sbírka úloh z fyziky pro studijní obory SOU a SOŠ*. Praha: Státní pedagogické nakladatelství Praha,n.p., 1988, ISBN 14-423-88.



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Relativnost současnosti

Název školy	Střední škola technická AGC a.s.
Název a číslo OP	OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost, CZ. 1.5 Název projektu: Výuka atraktivně a efektivně, č.p.: CZ.1.07/1.5.00/34.0057
Název šablony klíčové aktivity	III/2 Zvyšování kvality výuky prostřednictvím ICT
Tematická oblast (předmět)	Fyzika
Název sady vzdělávacích materiálů	Vybrané partie z fyziky pro IV. ročník středních technických škol
Jméno tvůrce vzdělávací sady	Ing. Stanislav Jakoubek
Číslo sady	III/2-1-3
Číslo DUMu	III/2-1-3-18
Anotace	V „běžném životě“ nemáme problém určit, zda dvě události nastaly ve stejném místě a zda nastaly nebo nenastaly současně. Ukážeme si, že při relativistických rychlostech nejsou tyto pojmy zdaleka tak zřejmé a dozvíme se, podle jakého kritéria jsme schopni o současnosti událostí rozhodnout.

Událost

- ▶ Odehrává se v určitém místě prostoru v určitém okamžiku
- ▶ Například záblesk svítilny v daném místě
- ▶ Bodová událost U – je charakterizována třemi prostorovými souřadnicemi a časem
- ▶ $U(x,y,z,t)$
- ▶ Soumístné události – nastávají v témže bodě určité vztažné soustavy

Současnost událostí

- ▶ Jestliže nastanou dvě soumísné události v soustavě S současně, pak budou tyto soumísné události současné i v soustavě S' , která se vzhledem k soustavě S pohybuje rovnoměrně přímočaře.
- ▶ Současnost soumísných událostí je absolutní pojem.

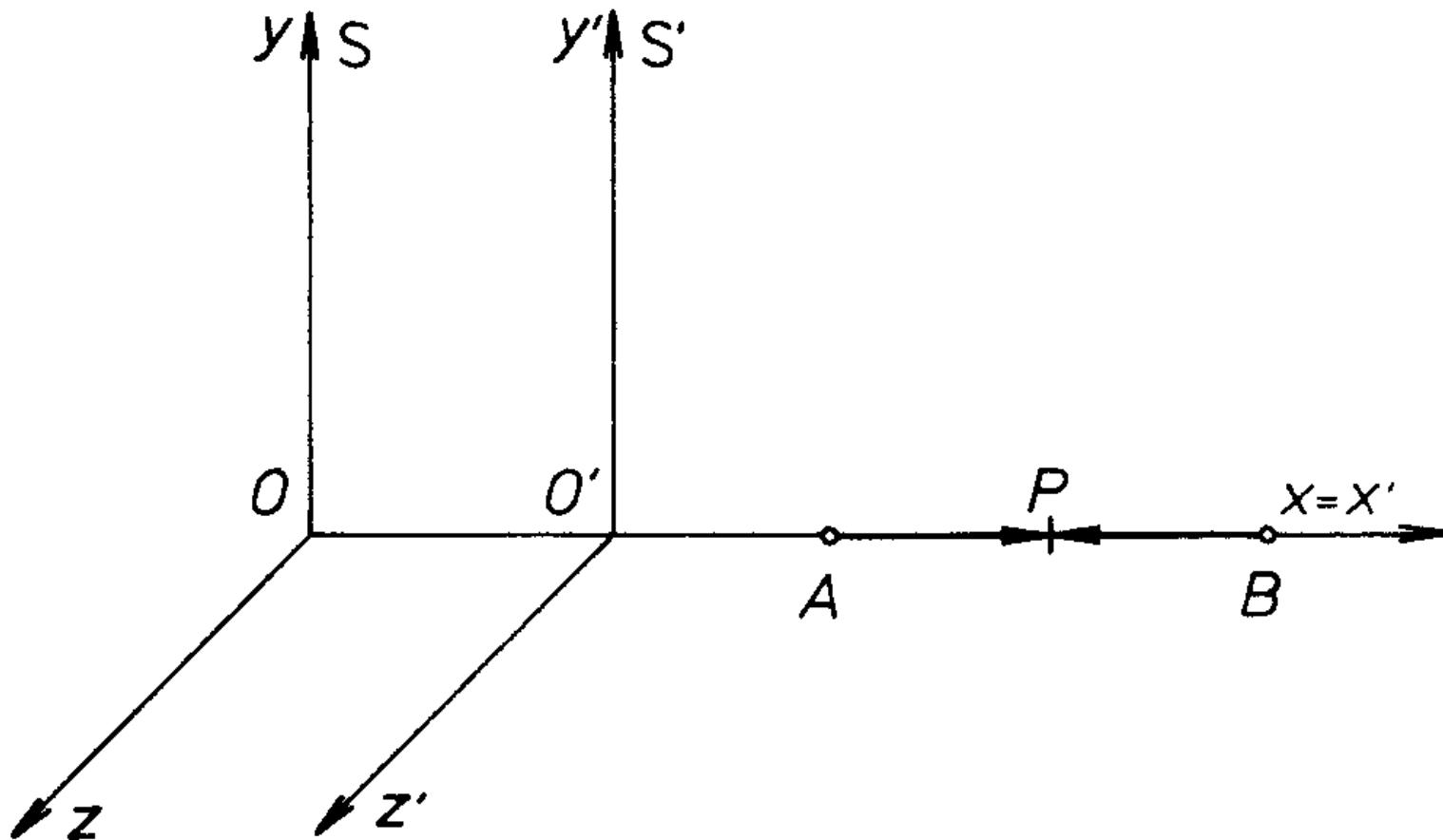
Příklad souměstnosti událostí

- ▶ Jedoucí sanitka vysílá světelné signály. Pro řidiče sanitky (soustava S') jde o události souměstné, kdežto pro pozorovatele na zemi (soustava S) jde o události nesouměstné (signály vznikají v různých místech).
- ▶ Souměstnost událostí je relativní pojem.

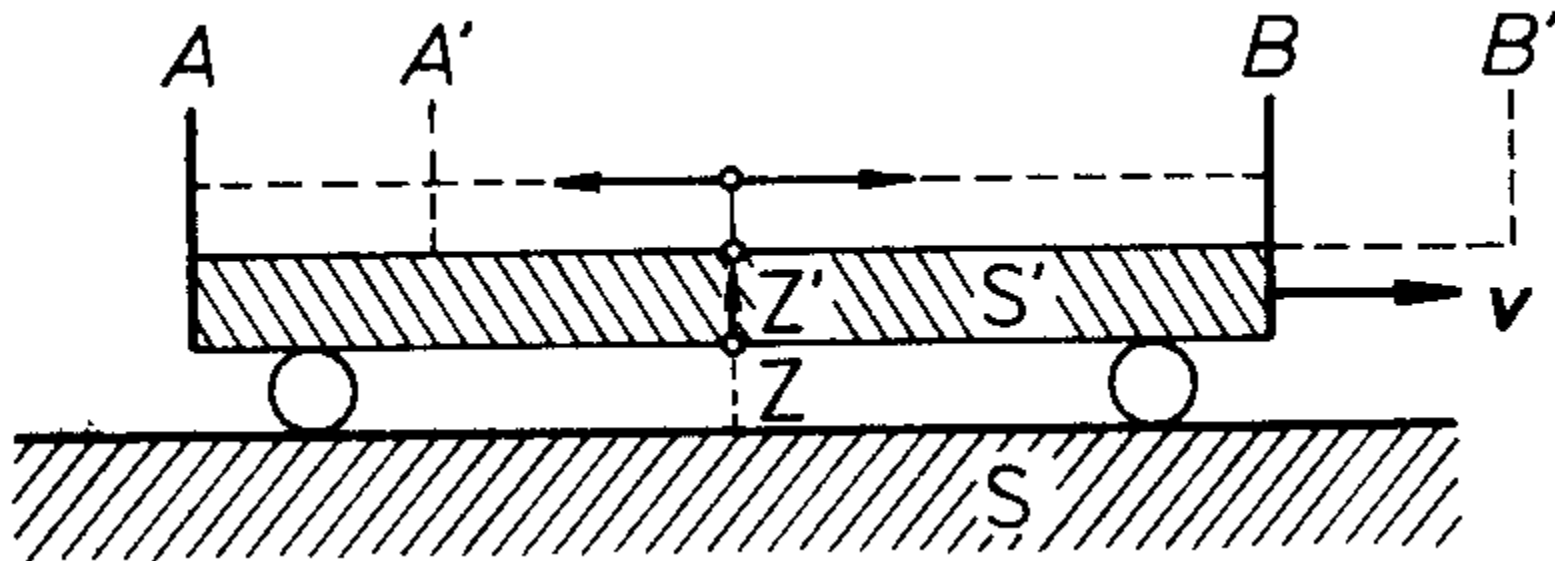
Současnost nesoumístných událostí

- ▶ Einsteinovo kritérium
- ▶ Dvě nesoumístné události v místech A,B v soustavě S' jsou současné, jestliže světelné signály vyslané z těchto bodů v okamžiku vzniku obou událostí dorazí současně do bodu P stejně vzdáleného od bodů A i B.

K Einsteinovu kritériu



Myšlenkový pokus



S – přímá trať, S' – pohybující se vagón jedoucí rychlostí v ; uprostřed vagónu je signální lampa Z a na koncích jsou rovinná zrcadla A, B . V určitém okamžiku lampa Z blikne.

Co vidí pozorovatelé?

- ▶ Pozorovatel na vagónu (v soustavě S'): světelný signál dopadne na obě zrcadla současně. Dvě nesoumítné události jsou pro něj současné.
- ▶ Pozorovatel na trati (v soustavě S): zrcadlo A se během šíření signálu posunulo do místa A' (blíže ke zdroji) a zrcadlo B do B' (dále od zdroje) $\Rightarrow$ pro něj jsou nesoumítné události nesoučasné.

Závěr z experimentu

- ▶ Současnost a souměstnost dvou událostí jsou relativní pojmy. O současnosti a souměstnosti dvou událostí lze mluvit jen tehdy, když je dána vztažná soustava.

Příklad

- ▶ Jak se liší měření délky tyče v případě, že tyč je vzhledem k pozorovateli v klidu a v případě, že se vzhledem k pozorovateli pohybuje?
- ▶ Pokud je v klidu, nemusíme měřit souřadnice koncových bodů současně. Pokud se pohybuje, tak je současně měřit musíme.

Literatura

- ▶ [1] BEDNAŘÍK, Milan et al. *Fyzika IV pro studijní obory středních odborných učilišť*. 2. vyd. Praha: SPN, 1989. 212 s. Učebnice pro střední školy.



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

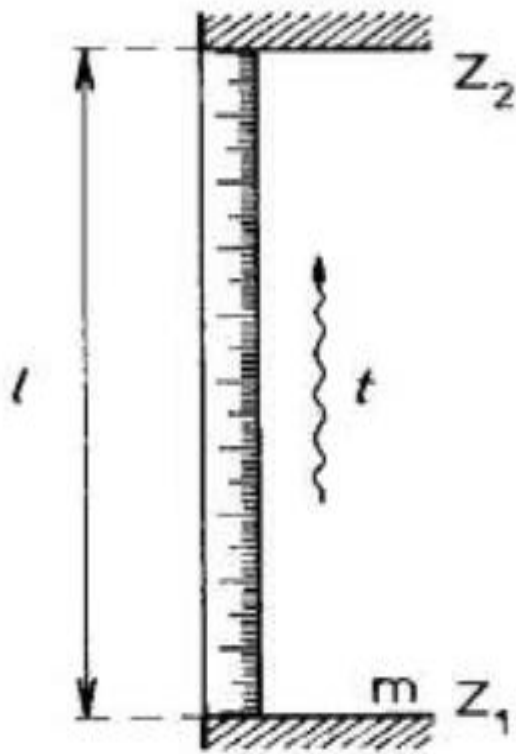
Základy relativistické kinematiky

Název školy	Střední škola technická AGC a.s.
Název a číslo OP	OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost, CZ. 1.5 Název projektu: Výuka atraktivně a efektivně, č.p.: CZ.1.07/1.5.00/34.0057
Název šablony klíčové aktivity	III/2 Zvyšování kvality výuky prostřednictvím ICT
Tematická oblast (předmět)	Fyzika
Název sady vzdělávacích materiálů	Vybrané partie z fyziky pro IV. ročník středních technických škol
Jméno tvůrce vzdělávací sady	Ing. Stanislav Jakoubek
Číslo sady	III/2-1-3
Číslo DUMu	III/2-1-3-19
Anotace	Již jsme poznali, že za extrémních podmínek se příroda chová nezvykle. Zdaleka jsme nevyčerpali všechny nezvyklosti, které pro nás příroda přichystala. Znějí vám myšlenky, že pohybující se hodiny jdou pomaleji nebo že se pohybující se těleso zkracuje, divně? Možná, nicméně je tomu tak. Po prostudování DUMu v tom budete mít jasněji. Doufám ☺.

Základní důsledky Einsteinových postulátů

- ▶ Dilatace (=protažení) času
- ▶ Kontrakce (=zkrácení) délek
- ▶ Vyplývá z nich, že měření času a délek není absolutní, ale závisí na vztažné soustavě.

Einsteinovy světelné hodiny



- Tyč o délce l , na jejímž konci jsou upevněna zrcadla Z_1 a Z_2
- Pokud na zrcadlo Z_1 dopadne světlo, vyšle elektrický signál
- Světlo opustí Z_1 , odrazí se od Z_2 a vrátí se zpět na Z_1

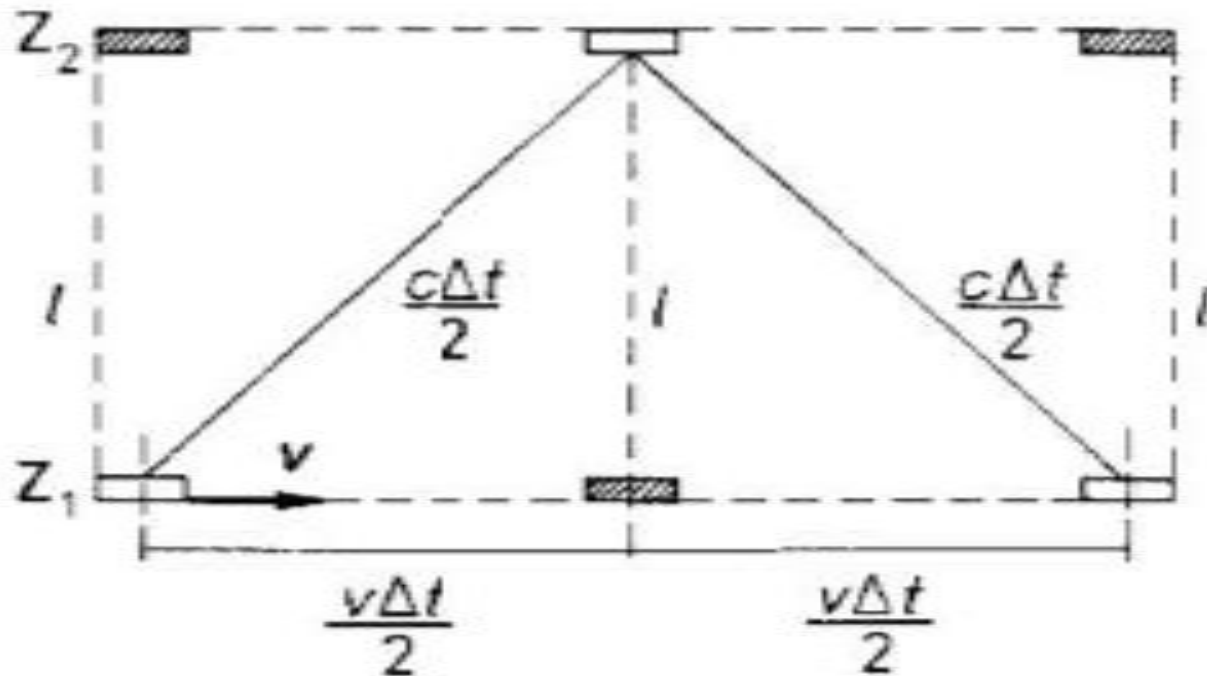
Časový interval mezi dvěma signály:

$$\Delta t_0 = \frac{2l}{c}$$

Myšlenkový pokus

- ▶ Jedny Einsteinovy hodiny v klidu
- ▶ Druhé umístěné na kosmické lodi; tyč je kolmá ke směru rychlosti jejího pohybu
- ▶ Země je vztažná soustava S
- ▶ Kosmická loď je vztažná soustava S'
- ▶ Jak se liší časové intervaly mezi dvěma signály měřené pozorovatelem na Zemi na jeho hodinách a na hodinách v kosmické lodi?

Dráha světelného impulsu pro pozorovatele na Zemi



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

Úprava výrazu

$$\frac{c^2 \Delta t^2}{4} = \frac{v^2 \Delta t^2}{4} + l^2$$

$$\frac{\Delta t^2}{4} (c^2 - v^2) = l^2$$

$$\Delta t^2 = \frac{4l^2}{c^2 - v^2} \Rightarrow \Delta t = \frac{2l}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{2l}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$\Delta t_0 = \frac{2l}{c}$$

Vzorec pro dilataci času

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

- Pozorovatel na Zemi naměří na hodinách na kosmické lodi delší časový úsek, než na svých hodinách na Zemi.
- Pro pozemského pozorovatele **jdou hodiny** na kosmické lodi **pomaleji**, než

~~jeho hodiny na Zemi.~~
Doba trvání téhož děje, měřená různými pozorovateli, je tím větší, čím větší je rychlost pohybu pozorovatele vzhledem k

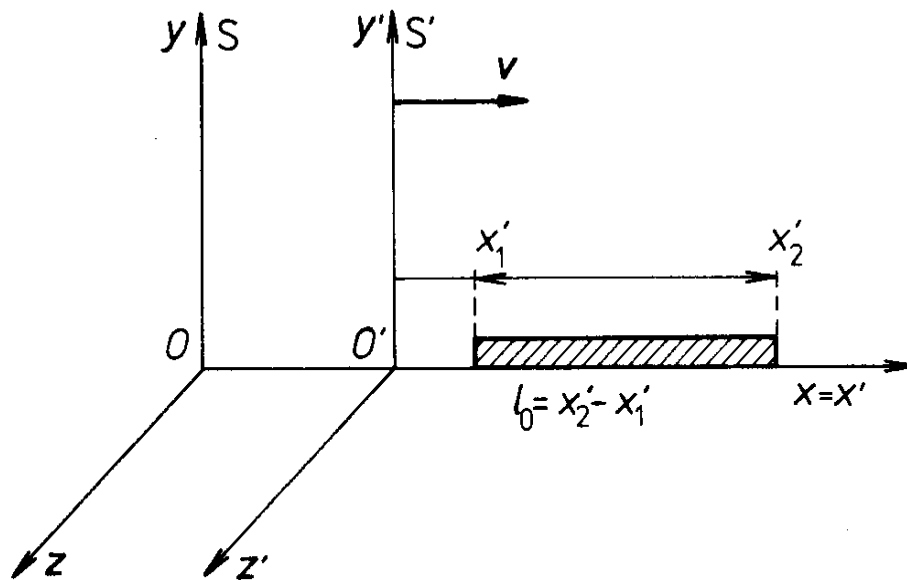
Poznámka

- ▶ Dilatace času byla experimentálně ověřena již v roce 1938 při proměřování spektra vodíkových iontů urychlovaných v anodové trubici.

Kontrakce délek

- ▶ Lze odvodit a zdůvodnit různými postupy a myšlenkovými experimenty
- ▶ Uvedeme pouze výsledek

Myšlenkový experiment



- S' se vůči S pohybuje rovnoměrně přímočaře
- Ve směru osy x je položena tyč o délce $l_0 = x'_2 - x'_1$ (toto naměří pozorovatel v S')
- Otázka: jakou délku naměří pozorovatel v S ?

Rozbor

- ▶ Pozorovatel v S' může naměřit souřadnice koncových bodů tyče v různých dobách, nemusí je určit současně
- ▶ Pozorovatel v S musí naměřit souřadnice současně, protože se vůči němu neustále mění
- ▶ Pomocí dilatace času lze odvodit vztah pro délku tyče měřenou ze soustavy S

Kontrakce délek – vzorec

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

Poznámka: $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} < 1 \Rightarrow l < l_0$
a:

Délka tyče je závislá na rychlosti pozorovatele a vztažné soustavy. Zkráceny naměříme jen ty rozměry, které jsou rovnoběžné se směrem rychlosti.

Poznámka

- ▶ Na rozdíl od dilatace času nebyla dosud kontrakce délky laboratorně přímo změřena.
- ▶ Přesto není žádný zásadní důvod o existenci tohoto jevu pochybovat.

Příklad

- ▶ Mion má střední dobu života $\tau = 2,2 \cdot 10^{-6} \text{s}$. Pohybuje se rychlostí $v = 0,9998c$. Vzniká ve výškách cca 10km nad povrchem Země. Jakou vzdálenost urazí za svojí krátkou dobu života? Jak je možné, že doletí až na Zem?

$$s = v \cdot \tau = 0,9998 \cdot 3 \cdot 10^8 \cdot 2,2 \cdot 10^{-6} \text{ m} \doteq 660 \text{ m} < 10 \text{ km}$$

Z hlediska klasické
(nerelativistické) fyziky mion na
Zem nemá šanci doletět.

Řešení pomocí dilatace času

$$\Delta t = \frac{\tau}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{2,2 \cdot 10^{-6}}{\sqrt{1 - \frac{(0,9998 \cdot c)^2}{c^2}}} \doteq 1,1 \cdot 10^{-4} \text{ s}$$

Toto je střední doba života mionu vnímaná pozorovatelem na Zemi.

Za tuto dobu

urazí:

$$s = v \cdot \Delta t = 0,9998 \cdot 3 \cdot 10^8 \cdot 1,1 \cdot 10^{-4} \text{ m} \doteq 32993 \text{ m} \doteq 33 \text{ km} > 10 \text{ km}$$

Řešení pomocí kontrakce délky

Z pohledu pozorovatele na Zemi vzniká mion ve výšce cca 10km. Jak se tato vzdálenost jeví z pohledu rychle letícího mionu?

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = 10000 \cdot \sqrt{1 - \frac{(0,9998c)^2}{c^2}} \doteq 200m < 660m$$

Příklad

- ▶ Ke hvězdě vzdálené 4 l.y. letí kosmická loď stálou rychlostí $0,7c$ vzhledem k Zemi. Jak dlouho bude cesta trvat a) pro pozorovatele na Zemi, b) pro pozorovatele v kosmické lodi?

Pro pozemského pozorovatele:

$$\Delta t = \frac{s}{v} = \frac{4}{0,7} \text{ roků} \doteq 5,7 \text{ roků}$$

Pro pozorovatele na kosmické lodi:

$$\Delta t_0 = \Delta t \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \doteq 5,7 \cdot \sqrt{1 - 0,7^2} \text{ roků} \doteq 4,1 \text{ roků}$$

Příklad

- Jakou rychlostí se musí pohybovat soustava S' ve směru osy $x=x'$, aby pozorovatel v soustavě S naměřil délku tyče zkrácenou na polovinu?

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

$$\frac{1}{4} = 1 - \frac{v^2}{c^2} \Rightarrow v = c \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$v = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1} \doteq 2,6 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$$

Literatura

- ▶ [1] BEDNAŘÍK, Milan et al. *Fyzika IV pro studijní obory středních odborných učilišť*. 2. vyd. Praha: SPN, 1989. 212 s. Učebnice pro střední školy.



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Základy relativistické dynamiky

Název školy	Střední škola technická AGC a.s.
Název a číslo OP	OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost, CZ. 1.5 Název projektu: Výuka atraktivně a efektivně, č.p.: CZ.1.07/1.5.00/34.0057
Název šablony klíčové aktivity	III/2 Zvyšování kvality výuky prostřednictvím ICT
Tematická oblast (předmět)	Fyzika
Název sady vzdělávacích materiálů	Vybrané partie z fyziky pro IV. ročník středních technických škol
Jméno tvůrce vzdělávací sady	Ing. Stanislav Jakoubek
Číslo sady	III/2-1-3
Číslo DUMu	III/2-1-3-20
Anotace	Známý výkřik zastánců zdravého životního stylu je, že když se budete víc hýbat, budete lehčí. Myslíte, že je tomu opravdu tak? Teorie relativity nám ukazuje opak. Nevěříte? Prostudujte si předložený DUM. Mimochodem, znáte vzorec $E=mc^2$? Pravděpodobně ano. A rozumíte mu? Pravděpodobně ne. To se změní pro prostudování materiálu.

V klasické fyzice platí

- ▶ Necht' na těleso působí stálá síla F , díky ní se pohybuje rovnoměrně zrychleně
- ▶ obecně platí 2. Newtonův zákon

$$\Delta p = F \Delta t$$

V klasické fyzice předpokládáme nezávislost hmotnosti tělesa na jeho

rychlosti

$$\Delta p \stackrel{\text{rychlosti}}{=} m \Delta v$$

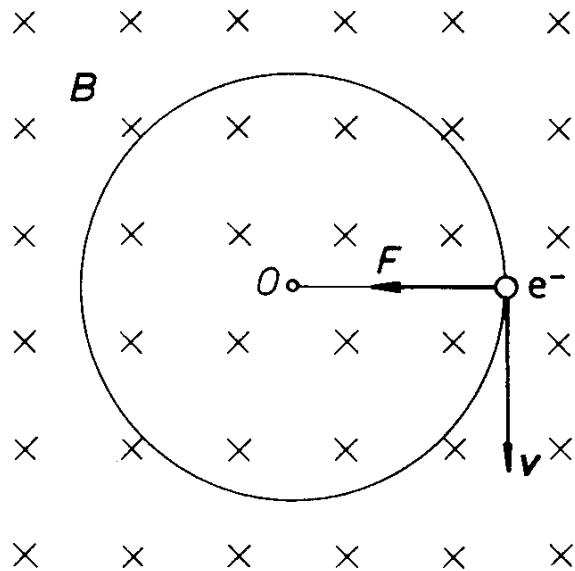
Přírůstek hybnosti se projeví pouze na přírůstku rychlosti $\Rightarrow$ těleso může dosáhnout libovolně velké rychlosti.

V teorii relativity

- ▶ Těleso nemůže dosáhnout libovolně velké rychlosti, c je limitní rychlost
- ▶ Proto se nárůst hybnosti nemůže projevit pouze ve zvyšování rychlosti, ale také ve změně (nárůstu) hmotnosti

Hmotnost tělesa není absolutní veličinou, ale závisí na rychlosti tělesa vzhledem ke vztažné soustavě.

Experimentální důkaz



$$\frac{mv^2}{R} = Bev \Rightarrow R = \frac{mv}{eB}$$

Pro $v \rightarrow c$: $r_{skut.} > R$

$$v, e, B = konst. \Rightarrow \uparrow m$$

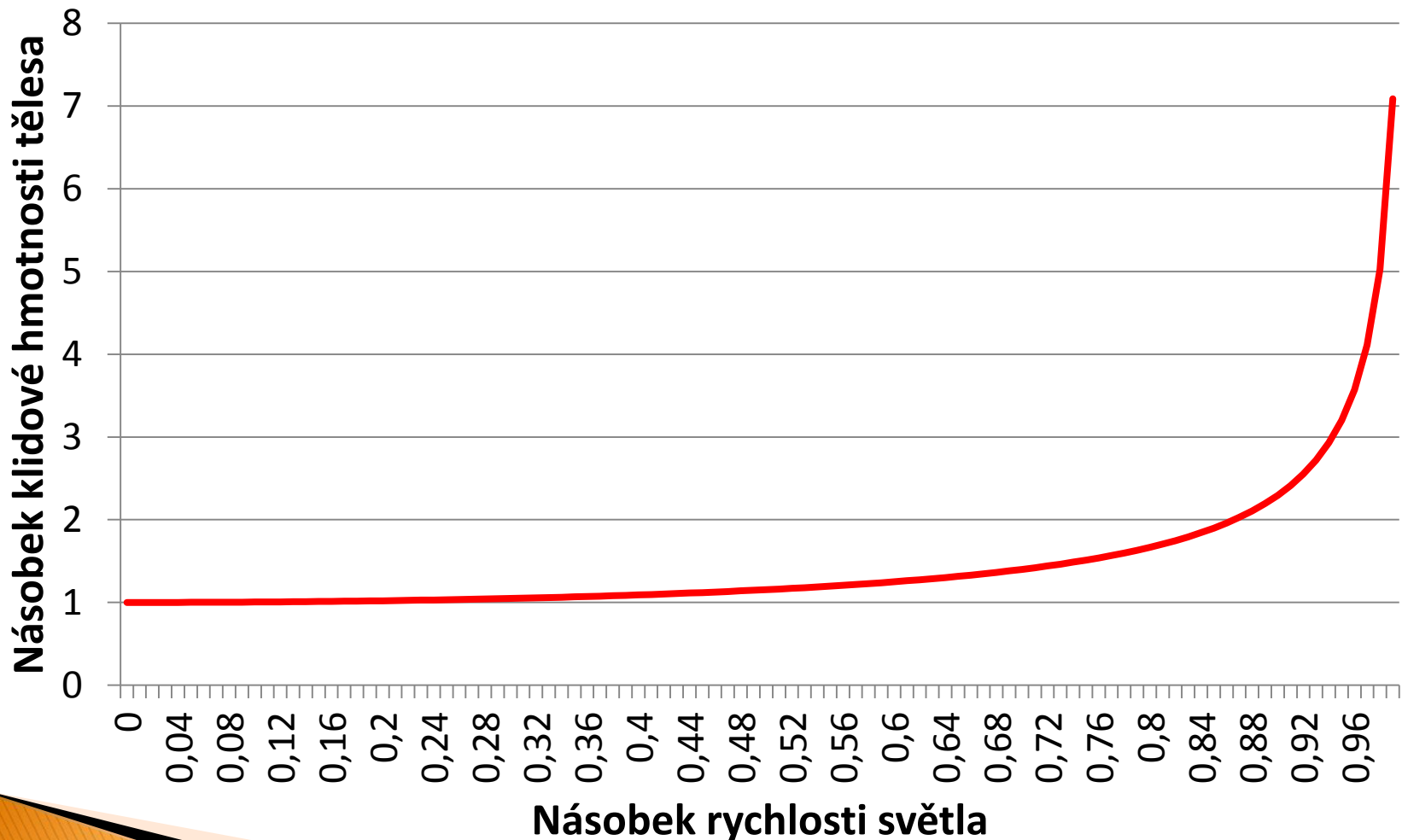
Vztah pro hmotnost

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

- m – hmotnost částice při rychlosti v (tzv. **relativistická hmotnost**)
- m_0 – **klidová hmotnost** částice (naměřená pozorovatelem, vůči němuž je částice v klidu)
- Pozn.: Pro $v \ll c$ lze pokládat

$$m = m_0$$

Závislost hmotnosti tělesa na v



Důležitý závěr

- ▶ Žádné makroskopické těleso (obecně žádná částice s nenulovou klidovou hmotností) nemůže dosáhnout (a tím pádem ani překonat) rychlost světla ve vakuu.

Z experimentů a z teorie plyne

- ▶ Změna energie částic souvisí s jejich hmotností.
- ▶ Každé změně energie soustavy těles ΔE odpovídá přímo úměrná změna hmotnosti Δm .

$$\Delta E = \Delta mc^2$$

Lze zobecnit

- ▶ Einstein zobecnil pro jakoukoliv energii E a hmotnost m .
- ▶ Einsteinův vztah

$$E = mc^2$$

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

Klidová energie

- ▶ Platí pro částici v klidu (v dané vztažné soustavě!)

$$E_0 = m_0 c^2$$

Zákon zachování energie

- ▶ Celková energie se skládá z klidové energie a z kinetické energie
- ▶ $E = E_k + E_0$
- ▶ Zákon zachování energie se vztahuje na celkovou energii.

Příklad

- ▶ Jak se změní hmotnost elektronu, který v dané vztažné soustavě z klidu dosáhl rychlosti $v = 0,999\,999\,92c$?

$$m_0 = 9,10938215 \cdot 10^{-31} \text{ kg}, v = 0,99999992c; m = ?$$

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{9,10938215 \cdot 10^{-31}}{\sqrt{1 - \frac{(0,99999992c)^2}{c^2}}} \text{ kg} \doteq 2,277 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

Pozn.: Hmotnost elektronu se zvýšila přibližně 2500 krát.

Příklad

- ▶ Jak velká energie je ekvivalentní hmotnosti 1 kg?

$$m = 1\text{kg}; E = ?$$

$$E = mc^2 = 1 \cdot (3 \cdot 10^8)^2 \text{ J} = 9 \cdot 10^{16} \text{ J}$$

Příklad

- ▶ Při jaké rychlosti je relativistický přírůstek hmotnosti tělesa 1 mg, je-li jeho klidová hmotnost 800 kg?

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \Rightarrow v = c \sqrt{1 - \frac{m_0^2}{m^2}} = 3 \cdot 10^8 \cdot \sqrt{1 - \frac{800^2}{800,000001^2}} \text{ m.s}^{-1} = 15000 \text{ m.s}^{-1}$$

Poznámka: 1 mg je malá, ale měřitelná hmotnost a 15 km.s⁻¹ je v raketové technice dosažitelná rychlost.

Literatura

- ▶ [1] BEDNAŘÍK, Milan et al. *Fyzika IV pro studijní obory středních odborných učilišť*. 2. vyd. Praha: SPN, 1989. 212 s. Učebnice pro střední školy.
- ▶ [2] BARTÁK, František a kol. *Sbírka úloh z fyziky pro studijní obory SOU a SOŠ*. Praha: Státní pedagogické nakladatelství Praha,n.p., 1988, ISBN 14-423-88.