

Meno a priezvisko:

Škola:

Predmet:

Školský rok/blok:

Skupina:

Trieda:

Dátum:

Bilingválne gymnázium C. S. Lewisa, Beňadická 38, Bratislava

Fyzika

/

Teória

Špeciálna teória relativity (ŠTR)

6 Klasické a relativistické predstavy o priestore a čase

1.6.0 Prečo vznikla špeciálna teória relativity (ŠTR) ?

Časť fyziky, ktorá skúma mechanický pohyb, je **mechanika**. Najstaršia časť mechaniky je **klasická mechanika** skúmajúca pohyb makroskopických telies, ktorých rýchlosť je malá v porovnaní s rýchlosťou svetla vo vákuu. Klasická mechanika bola vybudovaná na istých (vtedy dostupných) predstavách o priestore a čase.

Fyzika sa na základe **mechanického obrazu sveta**, o ktorého správnosti nikto nepochyboval, úspešne rozvíjala 200 rokov. Jedným z hlavných výsledkov Maxwellovej teórie elektromagnetického poľa však bolo zistenie, že elektrické a magnetické silové pôsobenie sa v priestore šíri **konečnou rýchlosťou** $c = 299\,792\,458\text{ m/s}$, ktorá sa rovná rýchlosti šírenia elektromagnetických vĺn (Maxwellova teória, elektromagnetická interakcia).

Ďalším dôležitým poznatkom Maxwellovej teórie bolo zistenie, že svetlo je elektromagnetické vlnenie v rozsahu vlnových dĺžok $\lambda \in \langle 380\text{nm}, 760\text{nm} \rangle$. Poznanie elektromagnetickej podstaty svetla, a tým i zjednotenie teoretickej optiky s elektrodynamikou v druhej polovici 19. storočia, patrí k najväčším objavom vo fyzike vôbec.

Fyzici si dovtedy predstavovali, že svetelné vlnenie je vlastne vlnenie **éteru**, ktorým je zaplnený celý vesmír. O éteri sa predpokladalo, že je v absolútnom pokoji a pre fyziku reprezentoval absolútny priestor. Rýchlosť šírenia svetla bola podľa predstáv fyzikov rýchlosťou šírenia svetelného vlnenia v tomto absolútne pokojnom éteri. Pretože Zem sa pri svojom pohybe okolo Slnka vzhľadom na pokojný éter pohybuje rýchlosťou približne 30 km/s , podľa mechanického zákona o skladaní pohybov a rýchlostí sa rýchlosť svetla mala skladať s rýchlosťou Zeme, teda rýchlosť svetla meraná v smere pohybu Zeme mala byť iná než rýchlosť svetla meraná v opačnom smere (resp. kolmom).

$$t_{\text{obe hu}} \doteq 365 \text{ dní} = 365.24.60.60 = 31563000 \text{ s};$$

$$r = AU \doteq 150 \text{ mil.km}$$

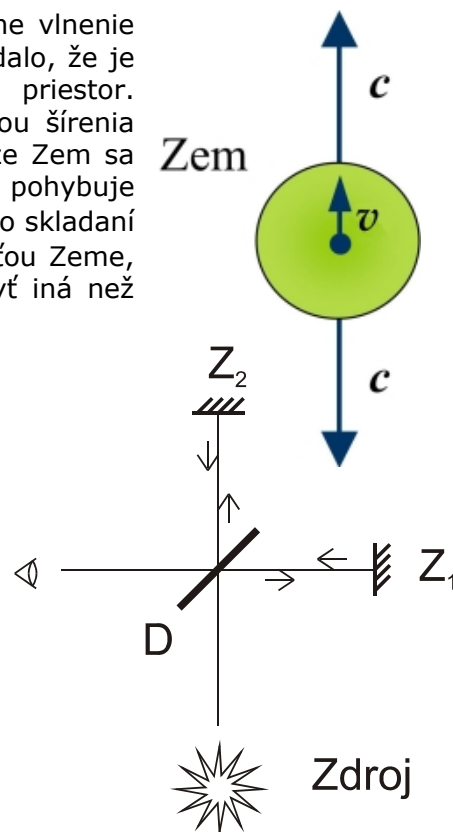
$$o_{\text{obe hu}} \doteq 2.\pi.r = 2.\pi.AU = 2.3,14159.150000000 = 942477777 \text{ km}$$

$$v_{\text{obe hu}} = \frac{t_{\text{obe hu}}}{o_{\text{obe hu}}} = \frac{942477777 \text{ km}}{31563000 \text{ s}} \doteq 30 \frac{\text{km}}{\text{s}}$$

$$c = 299792458 \frac{\text{m}}{\text{s}} \doteq 300000 \frac{\text{km}}{\text{s}}$$

Tento rozdiel sa pokúšali zmerať (r. 1887), všetky pokusy však ukázali, že v týchto dvoch smeroch (a vôbec vo všetkých smeroch bez ohľadu na smer pohybu Zeme) – **bola rýchlosť svetla úplne rovnaká**.

D - polopriepustné zrkadlo; Z_1 a Z_2 – zrkadlá; DZ_1 - v smere pohybu Zeme, otočíme o 90° $\rightarrow$ t.j. $DZ_1 \leftrightarrow DZ_2$



Aj keď sa fyzici predstavy éteru nakoniec vzdali, vo fyzike zostal neriešiteľný problém potvrdzovaný mnohými experimentami: **pre rýchlosť pohybu svetelného a elektromagnetického vlnenia neplatí klasický zákon o skladaní rýchlostí.**

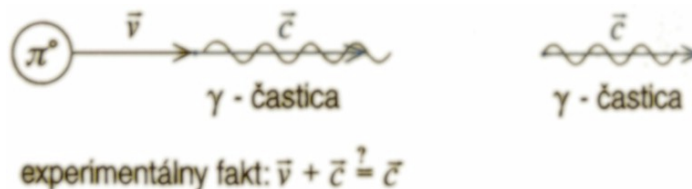
Fyzika sa ocitla v slepej uličke a musel sa objaviť vedec, ktorý sa nebál povedať, že **rýchlosť svetla je rovnaká vo všetkých inerciálnych sústavách bez ohľadu na ich rýchlosť.** Tento fakt odporujúci klasickej mechanike položil za jeden z pilierov novej teórie. Týmto vedcom bol Albert Einstein, ktorý v roku 1905 publikoval prácu, v ktorej zovšeobecnil Maxwellovu teóriu pre prípad šírenia elektromagnetických vln vo vzťažných sústavách pohybujúcich sa rovnomerne priamočiarno. Táto práca bola základom **špeciálnej teórie relativity**, ktorá vytvorila nový **relativistický obraz sveta**.

Overenie postulátu rýchlosti - Experiment CERN – relativistické skladanie rýchlostí

Postulát: Rýchlosť svetla emitovaného pohybujúcim sa zdrojom je rovnaká ako rýchlosť svetla emitovaného tým istým zdrojom, ktorý je v pokoji.

Experimentom v roku 1964 fyzici v CERN (európske laboratórium fyziky elementárnych častíc neďaleko Ženevy) skúmali elementárne častice π^0 - neutrálne pióny. Sú to nestabilné častice s krátkou dobou života – vznikajú v dôsledku zrážok v urýchlovači častíc. Tieto sa rozpadajú na dva fotóny γ -žiarenia v procese $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$. Tieto γ -lúče sú súčasťou elektromagnetického spektra a spĺňajú postulát rýchlosti svetla. V experimente bol vytvorený zväzok piónov pohybujúcich sa rýchlosťou $0,99975c$ vzhľadom k laboratóriu. Bola nameraná rovnaká rýchlosť emitovaného γ -žiarenia pohybujúcich sa piónov a piónov v pokoji vzhľadom na laboratórium. Podľa zákona skladania rýchlostí v klasickej mechanike by rýchlosť vyžiarenej γ -častice mala dosiahnuť $1,99975c$. V skutočnosti sa rýchlosť rovnala vždy $0,99975c$.

Tieto a iné experimenty potvrdili, že rýchlosť elektromagnetického žiarenia je v dvoch rôznych inerciálnych sústavách vždy rovnaká bez ohľadu na to, akou rýchlosťou sa vzájomne voči sebe pohybujú.



1.6.1 Princípy špeciálnej teórie relativity

Základom špeciálnej teórie relativity sú dva princípy:

1. **Princíp stálej rýchlosti svetla vo vákuu:** Vo všetkých inerciálnych vzťažných sústavách má rýchlosť svetla vo vákuu rovnakú veľkosť, ktorá nezávisí od smeru šírenia ani od rýchlosti pohybu svetelného zdroja.
2. **Princíp relativity:** Vo všetkých inerciálnych vzťažných sústavách majú fyzikálne zákony rovnaký tvar.

Z princípu relativity vyplýva, že žiadnym fyzikálnym pokusom, vykonaným vo vnútri inerciálnej vzťažnej sústavy, nemožno rozhodnúť, či sa táto sústava vzhľadom na inú sústavu pohybuje rovnomerným priamočiarym pohybom, alebo je v pokoji.

Špeciálna teória relativity rozšírila platnosť Galileiho princípu relativity, ktorý sa vzťahoval na zákony mechaniky – na všetky fyzikálne zákony.

V 19. storočí fyzici predpokladali, že celý vesmír je zaplnený prostredím, ktoré nazývali **éter**; elektromagnetické vlnenie, teda aj svetlo, je vlnením éteru. Vzťažná sústava spojená s éterom mala mať vo fyzike výsadné postavenie – nazývala sa absolútna vzťažná sústava. Pohyb, respektíve pokoj vzhľadom na túto sústavu je absolútny pohyb, resp. pokoj. Rýchlosťou c svetla vo vákuu sa myslela fázová rýchlosť svetla vzhľadom na éter.

1.6.2 Klasická mechanika (kinematika a dynamika - opakovanie)

Mechanický obraz sveta, ktorý bol súčasťou klasickej mechaniky, zahrnoval tieto modely priestoru, času a interakcie medzi fyzikálnymi objektami:

1. Predstavu absolútneho priestoru, ktorý existuje nezávisle od toho, čo sa v ňom deje, ale aj nezávisle od toho, aké sily v ňom pôsobia;
2. predstavu absolútneho času, ktorý plynie sám osebe nezávisle od hmoty a jej pohybu, pričom žiadne javy ho neovplyvňujú;
3. sily pôsobiace okamžite na diaľku, t.j. silové pôsobenie medzi fyzikálnymi objektami sa šíri nekonečnou rýchlosťou.

Mechanická fyzika

Galileo Galilei

- mechanický princíp relativity

Isaac Newton

- základy mechaniky
- pohybové zákony

Nemechanická fyzika

Ch. Huygens

- svetlo ako vlnenie

J. C. Maxwell

teória elektromagnetického poľa

Ludwig Boltzmann

Maxwell – Boltzmanova kinetická teória

Koniec 19. storočia – myšlienka uzavretia fyziky na základe mechaniky, teórie elektromagnetického poľa, Maxwell-Boltzmanovej teórie.

Dva problémy:

Problematiká éteru -> teória relativity

Tzv. ultrafialová katastrofa -> kvantová teória

Mechanika skúma najjednoduchšiu formu pohybu – mechanický pohyb. Pod mechanickým pohybom rozumieme zmenu polohy objektu v čase. Takým objektom môže byť hmotný bod, teleso, sústava bodov či telies, ale aj kvapalina, plyn a pod.

Mechanika sa delí na **kinematiku** a **dynamiku**. Kinematika skúma pohyb v priestore a čase, ale pritom si nevšíma príčiny, ktoré ho vyvolávajú. Dynamika skúma pohyb v súvislosti s príčinami, ktoré ho spôsobujú.

Kinematika sa zaoberá určením polôh bodov a ich zmien v čase. Kinematika pohyb telesa opisuje, nezaobera sa príčinami pohybu. Pri teoretickom štúdiu mechanického pohybu (proces, pri ktorom sa mení poloha jedného telesa vzhľadom na iné teleso) sa zavádza pojem hmotný bod.

Hmotný bod je model telesa, pri ktorom sa hmotnosť telesa zachováva, ale jeho rozmery sa zanedbávajú. Je to objekt, ktorého rozmery sú zanedbateľné vzhľadom na geometrické dimenzie, z hľadiska ktorých pohyb posudzujeme, ale jeho hmotnosť je konečná a zanedbateľná a treba s ňou počítať.

Na opis mechanického pohybu sa zavádza vzťažný bod a vzťažná sústava, vzhľadom na ktorú určujeme polohu telesa a jej zmenu v závislosti od času.

Mechanický pohyb - ak telesá alebo ich časti menia svoju polohu vzhľadom na iné telesá, hovoríme o mechanickom pohybe - pohyb sa deje v priestore a čase. Mechanický pohyb je najjednoduchšia forma pohybu.

Pokoj alebo pohyb môžeme určovať len vzhľadom na vzťažnú sústavu – relatívnosť pokoja a pohybu (**relatívnosť mechanického pohybu znamená, že opis pohybu závisí od voľby vzťažnej sústavy**).

Poloha hmotného bodu a jej vyjadrenie pomocou súradníc; Trajektória a dráha; Posunutie; Klasifikácia pohybov

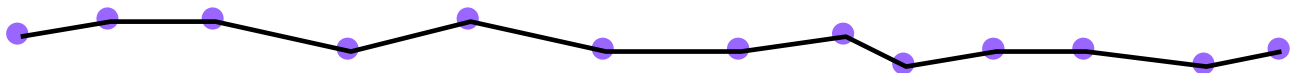
Pri fyzikálnych úvahách opisujeme pohyb vždy vzhľadom na určitú súradnicovú sústavu, v ktorej polohu bodu všeobecne určujú jeho tri súradnice. Najčastejšie ide o karteziánsku (pravouhlú) pravotočivú súradnicovú sústavu, v ktorej je poloha bodu určená súradnicami x , y , z .

Ak je bod v pokoji, sú jeho súradnice x , y , z v čase nepremenné – konštantné. Pri pohybe sú súradnice bodu funkciami času, takže platí $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$. Stručne môžeme povedať:

pokoj x , y , z sú konštanty

pohyb $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$ sú funkcie času

Mechanický pohyb vo všeobecnosti môže vyzeráť veľmi rozmanito. Existujú dva jednoduché typy mechanického pohybu: **translačný pohyb hmotného bodu (častice) po priamke** a **rotačný pohyb po kružnici**, ktoré majú tú vlastnosť, že **akýkoľvek mechanický pohyb možno rozložiť na konečný počet týchto dvoch pohybov**.



Trajektória je množina (súhrn) všetkých polôh, v ktorých sa hmotný bod pri pohybe vyskytuje, dĺžka trajektórie sa nazýva **dráha**.

Ak trajektória hmotného bodu je časť priamky, koná bod priamočiary pohyb, v ostatných prípadoch je to krivočiary pohyb.

Pri pozorovaní mechanického pohybu sledujeme zmeny polohy telesa v čase vzhľadom na vzťažné teleso. Pokoj alebo pohyb môžeme zisťovať len vzhľadom na vzťažnú sústavu. V tomto zmysle hovoríme o relatívnosti pokoja a pohybu.

Klasifikácia pohybov

Mechanický pohyb vo všeobecnosti môže vyzeráť veľmi rozmanito. Existujú dva jednoduché typy mechanického pohybu: **translačný pohyb hmotného bodu (častice) po priamke** a **rotačný pohyb po kružnici**, ktoré majú tú vlastnosť, že akýkoľvek mechanický pohyb možno rozložiť na konečný počet týchto dvoch pohybov.

A. Trajektórie: priamočiare
 krivočiare

B. Závislosti veľkosti rýchlosti od času:
 rovnomerne
 nerovnomerne

Pri pohybe po priamke rozlišujeme pohyby s konštantnou rýchlosťou (vektor rýchlosti nemení veľkosť, ani smer), pohyby s konštantným zrýchlením (nemení sa veľkosť ani smer vektora zrýchlenia) a všeobecné pohyby. Tretí prípad nebudeme rozoberať. V prvom, aj v druhom prípade bude cieľom získať vzťahy vyjadrujúce polohu pohybujúcej sa častice, teda jej karteziánske súradnice, ako funkciu času. V druhom prípade pôjde aj o vyjadrenie závislosti rýchlosti od času.

C. Zrýchlenia:

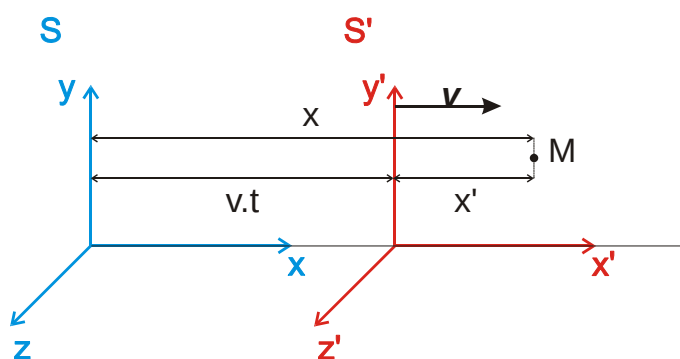
priamočiary rovnomerne zrýchlený
rovnomerný pohyb po kružnici

Teleso konečných rozmerov

Pri štúdiu pohybu Zeme okolo Slnka môžeme Zem považovať za hmotný bod, pretože rozmery Zeme sú v porovnaní so vzdialenosťou od Slnka a vzhľadom na presnosť určenia tejto vzdialenosti zanedbateľne malé. Avšak ak skúmame otáčavý pohyb Zeme okolo jej osi, takéto zanedbanie rozmerov Zeme urobiť nemôžeme.

Základné pojmy klasickej fyziky:

- vzťažná sústava
 - poloha bodu v priestore je definovaná súradnicami $A[x, y, z]$
- bodová udalosť $U[x, y, z; t]$
 - časopriestor
 - súmiestne udalosti
 - súčasné udalosti
- Newtonove pohybové zákony
 - inerciálna a neinerciálna soustava
- čas je absolútny
 - vo všetkých inerciálnych sústavách plynie čas rovnako rýchlo
 - súčasnosť udalostí je absolútna
- dĺžka je absolútna
- hmotnosť telesa je stála (nie je funkcia rýchlosti)
- zákon skladania rýchlostí
- Galileiho (mechanický) princíp relativity
- Galileiho transformácia súradníc



$$x' = x - v.t$$

$$x = x' + v.t'$$

$$y' = y$$

$$y = y'$$

$$z' = z$$

$$z = z'$$

$$t' = t$$

$$t = t'$$

Vzťažné teleso

Vzťažná sústava môže byť viazaná i na viac telies, ktoré sú voči sebe v pokoji. Pohyb a pokoj sú potom veličiny relatívne. Vzhľadom na jednu vzťažnú sústavu teleso môže byť v pokoji, avšak vzhľadom na inú vzťažnú sústavu v pohybe a opačne. Pohyb auta obvykle skúmame vzhľadom na povrch Zeme, ktorú považujeme za nehybnú. (Skutočný pohyb Zeme v časovom intervale, v ktorom dej skúmame môžeme zanedbať.) Šofér v aute vzhľadom na auto je v pokoji, avšak vzhľadom na Zem je v takom istom pohybe ako auto. Pohyb šoféra vzhľadom na sústavu pevne spojenú napr. so Slnkom je už pohyb zložený.

Inerciálna sústava

Inerciálna vzťažná sústava - vzťažná sústava, v ktorej izolovaný hmotný bod (teleso, častica) zotrúva v pokoji, alebo v rovnomernom priamočiarom pohybe. Platia v nej Newtonove pohybové zákony.

Neinerciálna sústava

Sily v neinerciálnych sústavách

Skúmame pohyb častice (resp. hmotného bodu), na ktorý pôsobí sila $\mathbf{F}$. Ak skúmame pohyb častice z hľadiska absolútnej sústavy S , pre časticu platí Newtonova pohybová rovnica $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$. Chceme vedieť ako sa zmení pohybová rovnica tej istej častice, pohybujúcej sa za rovnakých podmienok, ale vzhľadom na neinerciálnu sústavu S' . Prv než pristúpime k matematickému riešeniu tohto problému, ozrejmime si ho na nasledujúcom experimente:

Predstavme si, že sme si urobili výlet do sveta našej slnečnej sústavy. Nasadli sme na raketoplán a naša Zem je už len maličkou hviezdikou. Sme ďaleko od príťažlivých telies. Čo sa deje s našimi vecami v raketopláne, ak máme motor vypnutý? Teplomer je v divnej polohe, tak isto kyvadlo hodín sa zastavilo v akejsi polohe, rôznej od zvislého smeru. Predmety i naše meracie prístroje sa vznášajú v kabíne. Vysvetlí túto skutočnosť vieme, nenachádzame sa na Zemi, ale v medziplanetárnom priestore, v ktorom predmety stratili tiaž.

Čo sa stane, ak sa rozhodneme zapnúť motor raketoplánu a začne sa pohybovať rovnomerne zrýchleným pohybom? Predmety, ktoré sa vznášali okolo nás sa dali do pohybu. Akým smerom a akou rýchlosťou? Ak raketoplán sa pohybuje so zrýchlením $9,81 \text{ m.s}^{-2}$ cítime sa ako doma. Teplomer „spadol“, hodiny sa dali do vertikálnej polohy. Ak pustíme tenisovú loptičku a zmeriame, s akým zrýchlením padá, dospejeme k výsledku, že zrýchlený pohyb loptičky bude čo do veľkosti vždy taký, ako zrýchlenie nášho raketoplánu. Smer „padania“ loptičky bude vždy opačný ako smer pohybu raketoplánu. To platí pre všetky predmety vo vnútri lode. Ak sa pohybuje raketoplán dopredu, všetky predmety sa pohybujú smerom opačným - dozadu. Toto pozorovanie možno sformulovať nasledovne:

Ak sa raketoplán pohybuje s určitým zrýchlením, telesá v ňom začínajú mať „tiaž“. Pritom „príťažlivá sila“ má smer opačný ako vektor zrýchlenia raketoplánu a zrýchlenie voľného „pádu“ telies sa veľkosťou rovná zrýchleniu raketoplánu.

Zaujímavosťou je, že pozorovaním nemôžeme odlišiť zrýchlený pohyb systému od príslušnej príťažlivej sily. To znamená, že ak okná v raketopláne máme zakryté, nerozlíšime, či je raketoplán v pokoji, alebo sa pohybuje so zrýchlením $9,81 \text{ m.s}^{-2}$. Rozdiel však je v smeroch pôsobiacich zrýchlení. Na Zemi smeruje príťažlivá sila do stredu Zeme. To znamená, že smery zrýchlenia v dvoch rôznych bodoch na Zemi tvoria medzi sebou uhol. V raketopláne, ktorý sa pohybuje zrýchlene, sú smery príťažlivosti vo všetkých bodoch presne paralelné. Na Zemi sa mení zrýchlenie s výškou, v raketopláne so zrýchleným pohybom tento efekt nevzniká. Napriek týmto odlišnostiam možno považovať zrýchlenie a pôsobenie príťažlivej sily za ekvivalentné.

Takmer úplná rovnocennosť zrýchlenia a pôsobenia príťažlivej sily nazývame princíp ekvivalencie. Tento princíp umožňuje riešiť mnohé úlohy pomocou fiktívnej príťažlivej sily, ktorá sa javí v systémoch pohybujúcich sa zrýchlene. Uvidíme, že pohybovú rovnicu v neinerciálnom systéme je možné riešiť obdobne ako v inerciálnom systéme, ak k výslednici síl pôsobiacich na teleso pridáme sily fiktívne, súvisiace s neinerciálnosťou systému, ktoré nazveme spoločným názvom silami zotrvačnými.