

## 1.4.1 Inerciální vztažné soustavy, Galileiho princip relativity

**Předpoklady:** 1205

**Pedagogická poznámka:** Úvodem chci upozornit, že sám považuji výuku neinerciálních vztažných soustav na gymnáziu za tragický omyl. Žáci se zcela přirozeně snaží popisovat situace z inerciální vztažné soustavy, nejčastěji takové, která se (alespoň zdánlivě) nepohybuje.

Tendence popisovat svět z hlediska stojícího pozorovatele je tak silná, že většina z nich jedním dechem tvrdí, že popisuje pokus z hlediska zrychlujícího vlaku, a zároveň tento vlak (ze kterého svět pozorují) vidí zrychlovat.

Nejhorším důsledkem výuky neinerciálních vztažných soustav je však podkopání Newtonových zákonů. Žáci rádi přistoupí na to, že když někde něco nefunguje, stačí přidat další sílu a všechno je v pořádku. Odkud se na děj dívají, už je příliš netrápí. Nejoblíbenější je pak opětovné zavedení odstředivé síly, která se začne rychle objevovat na všech kolotočích bez ohledu na místo, ze kterého je pozorujeme.

Kapitola o neinerciálních vztažných soustavách přináší dost neobvyklý pohled na některé jevy. Přesto nijak nezpochybňuje platnost čehokoliv, co jsme probírali v minulých hodinách. Pokud se Vám začne zdát, že nové informace jsou v rozporu s těmi staršími, doporučuji držet se těch starších.

Návrat na začátek: Rychlost je relativní.

Co to znamená?

Záleží odkud pohybující těleso sledujeme.

Průvodčí ve vlaku:

- z pohledu cestujících stojí,
- z pohledu výpravčího se pohybuje stejnou rychlostí jako vlak.

Vztažná soustava - místo odkud pozorujeme.

Ne všechny vztažné soustavy jsou stejně vhodné. Existují dva druhy souřadných soustav.

- „Normální soustavy“, kde platí 1. Newtonův zákon (nástupiště, stojící vlak, vlak jedoucí rovnoměrně přímočaře), kterým říkáme **inerciální**.
- „Divné soustavy“, kde neplatí 1. Newtonův zákon (vlak jedoucí zrychleně, nebo projíždějící zatáčkou), kterým říkáme **neinerciální**.

⇒ **Všechny pokusy jsme se snažili popisovat z inerciálních vztažných soustav.**

Dvě možnosti, jak poznat, že se naše soustava pohybuje:

- pohled ven, zda se nepohybuje okolí,
- provedení pokusu, jehož výsledek umožňuje o pohybu rozhodnout.

Pohled ven někdy klame.

Sedíme ve stojícím vlaku, sousední vlak se začíná rozjíždět ⇒ zdá se nám, že se rozjíždí náš vagón ⇒ divný pocit, že necítíme rozjíždění.

Vlak se rozjíždí ⇒ začíná se pohybovat vůči Zemi. Je ale jisté, že se díky tomu nezastaví vůči Slunci, kolem kterého se Země otáčí?

**Př. 1:** Oběť únosu je spoutána v luxusním autě s převázanýma očima, na uších má sluchátka s nahlas puštěnou hudbou. V kterých okamžicích bude mít oběť představu o tom, jak se pohybuje? Je oběť schopna rozeznat rychlost auta?

Oběť pozná:

- zrychlování (tlačí ji do sedadla),
- zpomalování (zvedá ji ze sedadla),
- zatáčení (tlačí ji ke straně).

Rychlost auta rozeznat nedokáže, pokud se nemůže podívat ven a neslyší hluk motoru, okolního vzduchu apod.

**Př. 2:** U předního skla auta je zavěšena na provázku ozdoba. Jak se na ozdobě projeví následující pohyby auta: a) auto stojí b) auto zrychluje  
c) auto jede rovnoměrně malou rychlostí d) auto zatáčí  
e) auto jede rovnoměrně velkou rychlostí f) auto brzdí.  
Pro každou situaci nakresli obrázek. Rozmysli si, zda změny na ozdobě umožní změřit rychlost (zrychlení) auta.

a) auto stojí

Ozdoba visí svisle, výsledná síla je nulová.

c) auto jede rovnoměrně malou rychlostí

Ozdoba visí svisle, výsledná síla je nulová.

e) auto jede rovnoměrně velkou rychlostí

Ozdoba visí svisle, výsledná síla je nulová.

b) auto zrychluje

Ozdoba se nakloní směrem dozadu (od skla) ⇒ objeví se výsledná síla, která urychluje ozdobu směrem dopředu (s autem). Větší náklon znamená větší zrychlení.

d) auto zatáčí

Ozdoba se nakloní ven ze zatáčky ⇒ objeví se výsledná síla, která hraje roli dostředivé síly a zatočí ozdobu. Větší náklon znamená větší dostředivé zrychlení.

f) auto brzdí

Ozdoba se nakloní směrem dopředu (ke sklu) ⇒ objeví se výsledná síla, která zpomaluje ozdobu (s autem). Větší náklon znamená větší zpomalení.

**Př. 3:** Navrhni pokus, kterým bys uvnitř výtahu zjistil, zda výtah zrychluje, zpomaluje nebo stojí. Bylo by možné tímto pokusem rozlišit, zda se výtah pohybuje rovnoměrně nebo stojí?

Můžeme rozvěsit závaží na pružinu a měřit její prodloužení, nebo ještě jednodušeji, stoupnout si na váhu. Rozlišíme:

- zrychlování výtahu (při cestě vzhůru vyšší údaj na váze nebo větší prodloužení pružiny),
- zpomalování výtahu (při cestě vzhůru nižší údaj na váze nebo menší prodloužení pružiny),

- stání nebo rovnoměrný pohyb výtahu.

Nedokážeme rozlišit klid a rovnoměrný pohyb ani rovnoměrné pohyby různou rychlostí.

⇒ Ze všech předchozích úvah vyplývá **Galileův (mechanický) princip relativity (několik různých formulací)**:

- Žádným mechanickým pokusem nelze zjistit, jestli se vztažná soustava pohybuje pohybem rovnoměrným přímočarým nebo je v klidu.
- Zákony mechaniky jsou stejné ve všech inerciálních soustavách.
- Všechny inerciální soustavy jsou pro popis mechanických dějů rovnocenné.

Proč nerozeznáme rovnoměrný pohyb od klidu?

Umíme měřit síly, síly mění stav předmětů, nutí tělesa k pohybu.

1. Newtonův pohybový zákon: Těleso s nulovou výslednou silou se pohybuje rovnoměrně přímočaře nebo je v klidu.

2. Newtonův pohybový zákon:  $F = ma$ .

⇒ Síla je svázána se zrychlením, změny silového působení se objeví pouze v případě, že předměty zrychlují.

**Dodatek:** Mechanický princip relativity nevyklučuje rozlišení inerciálních vztažných soustav pomocí nemechanických (například optických) jevů. V 19. století byla provedena řada pokusů, které měly měřením rychlosti světla rozlišit různé inerciální soustavy. Negativní výsledek těchto pokusů vedl k rozšíření mechanického principu relativity na všechny fyzikální jevy (princip relativity) a vzniku teorie relativity.

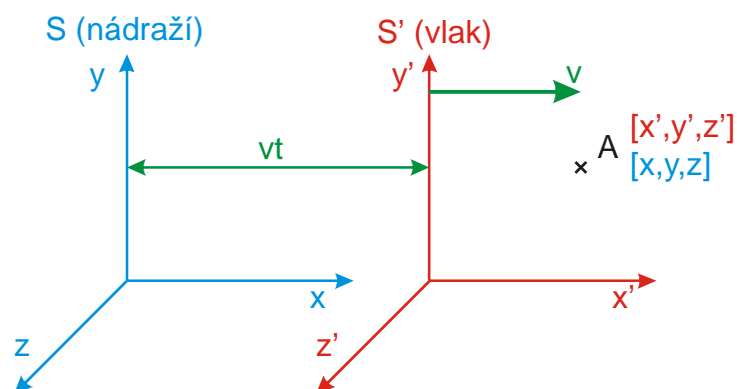
**Pedagogická poznámka:** Zbývající část hodiny většinou vynecháváme. Probíráme ji pouze v případě nadbytku času, nebo jako dobrovolnou práci pro nadšence.

Sledujeme libovolný fyzikální pokus: při pohledu z libovolného inerciální soustavy uvidíme stejné děje, hodnoty veličin ale stejné být nemusí.

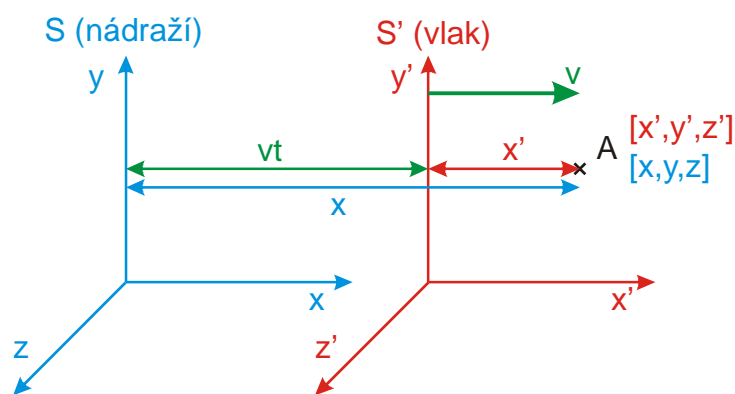
Jak se liší souřadnice, které naměříme z nádraží a z vlaku, který nádražím rovnoměrně projíždí?

Nejjednodušší případ:

- osy obou soustav mají stejný směr,
- v čase  $t = 0$ s jsou počátky obou soustav ve stejném bodě,
- vlak jede ve směru osy  $x$ .



Jak spolu souvisí souřadnice  $x$  a  $x'$ ?



Z obrázku je vidět, že platí:  $x = x' + vt$ .

Kompletní sada transformačních rovnic – Galileiho (speciální) transformace:  $x = x' + vt$ ,  $y = y'$ ,  $z = z'$ ,  $t = t'$ .

**Př. 4:** Vlak projíždí rovnoměrně přímočaře rychlostí 20 m/s nádražím tak, že směr jeho jízdy je shodný s osou  $x$  souřadného systému, zvoleného na nádraží tak, že vlak projede v čase 0 s jeho počátkem. Sestav rovnice pro transformaci souřadnic naměřených strojvůdcem vlaku do soustavy souřadnic výpravčího na nádraží (v čase 0 s se obě soustavy souřadnic shodují). Strojvůdce naměřil v čase  $t = 5$  s průvodčímu souřadnice  $[-2; 2; 1]$ . Urči souřadnice průvodčího v soustavě souřadnic na nádraží.

Galileiho (speciální) transformace:  $x = x' + vt$ ,  $y = y'$ ,  $z = z'$ ,  $t = t'$ .

Dosadíme  $v = 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ :  $x = x' + 20t$ ,  $y = y'$ ,  $z = z'$ ,  $t = t'$ .

Souřadnice bodu  $[-2; 2; 1]$  v souřadném systému nádraží v čase  $t = 5$  s:  $x = -2 + 20 \cdot 5 = 98$ ,  $y = y'$ ,  $z = z'$ ,  $t = t' \Rightarrow [98; 2; 1]$ .

V souřadné soustavě nádraží má průvodčí v čase  $t = 5$  s souřadnice  $[98; 2; 1]$ .

**Př. 5:** Vlak projíždí rovnoměrně přímočaře rychlostí 20 m/s nádražím tak, že směr jeho jízdy je shodný s osou  $x$  souřadného systému, zvoleného na nádraží tak, že vlak projede v čase 0 s jeho počátkem. Sestav rovnice pro transformaci souřadnic naměřených výpravčím na nádraží do soustavy souřadnic strojvůdce ve vlaku (v čase 0 s se obě soustavy souřadnic shodují). Výpravčí naměřil v čase  $t = 4$  s své plácačky souřadnice  $[5; -3; 2]$ . Urči souřadnice plácačky v soustavě souřadnic strojvůdce ve vlaku.

Galileiho (speciální) transformace:  $x = x' + vt$ ,  $y = y'$ ,  $z = z'$ ,  $t = t'$ .

Musíme vypočítat čárované souřadnice (z pohledu vlaku) z nečárovaných (z pohledu nástupiště):  $x' = x - vt$ ,  $y' = y$ ,  $z' = z$ ,  $t' = t$ .

Dosadíme  $v = 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ :  $x' = x - 20t$ ,  $y' = y$ ,  $z' = z$ ,  $t' = t$ .

Souřadnice bodu  $[5; -3; 2]$  v souřadném systému nádraží čase  $t = 4$  s:  $x' = 5 - 20 \cdot 4 = -75$ ,  $y = y'$ ,  $z = z'$ ,  $t = t' \Rightarrow [-75; -3; 2]$ .

Souřadné soustavě nádraží má průvodčí souřadnice  $[-75; -3; 2]$ .

---

**Shrnutí:** Žádným mechanickým pokusem nezjistíme, zda je naše vztažná soustava v klidu nebo v pohybu rovnoměrném přímočarém.