1.4.4 Rotující vztažné soustavy I

Předpoklady: 1403

Ke zkoumání rotujících vztažných soustav nepotřebujeme nákladnou aparaturu. Stačí rodič s dítětem a řetízkový kolotoč.

Př. 1: Tatínek se synem si užívají na pouti. Syn se točí na řetízkovém kolotoči, tatínek udržuje sociální vazby s kamarády na ploše u kolotoče. Nakresli syna i otce a síly, které na ně působí. Jaké jsou jejich výslednice?

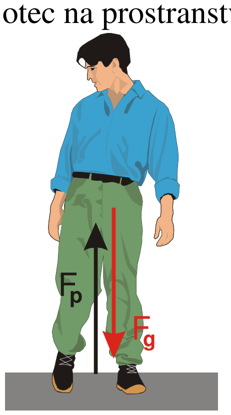
syn na kolotoči

Na syna působí dvě síly:

- gravitační síla Země F_g svisle dolů,
- síla závěsu F_z, která působí ve směru řetězů, kterými je sedačka připevněna ke kolotoči.

Jakmile se kolotoč roztočí, sedačka se vykloní a výslednice obou sil je nenulová, směřuje do středu kolotoče a hraje roli dostředivé síly $\Rightarrow$ její velikost je dána vztahem $F_v = F_d = m\frac{v^2}{r} = m\omega^2 r$.

otec na prostranství u kolotoče



Na tatínka působí dvě síly:

- gravitační síla Země F_g svisle dolů,
- síla podložky F_p, která svisle vzhůru.

Výsledná síla působící na tatínka je nulová.

Pohled použitý při řešení předchozího příkladu neplatí pro každého. Jde o pohled z hlediska tatínka, jeho kamarádů a ostatních lidí, kteří stojí na prostranství u kolotoče.

Př. 2: Popiš z hlediska vztažné soustavy spojené s chlapcem na kolotoči pohyb následujících předmětů:
a) chlapce samotného, b) jeho kamaráda na sousední sedačce,
c) tatínka stojícího u kolotoče, d) blízkého paneláku.

Pohyb předmětů z pohledu vztažné soustavy spojené s chlapcem na kolotoči.
a) pohyb chlapce samotného
Chlapec se nepohybuje, je v klidu.

b) pohyb kamaráda na sousední sedačce,
Kamarád se nepohybuje, je v klidu.

c) pohyb tatínka stojícího u kolotoče
Tatínek se pohybuje, otáčí se okolo stojícího syna (který se točí na kolotoči). Nepohybuje se však okolo syna po kružnici, protože je v různých okamžicích od syna různě daleko.

d) blízkého paneláku.
Panelák se pohybuje, otáčí se okolo stojícího syna (který se točí na kolotoči). Nepohybuje se však okolo syna po kružnici, protože je v různých okamžicích od chlapce různě daleko.

Př. 3: Nakresli obrázek chlapce sedícího na kolotoči a sil, které na něj působí. Urči výslednici těchto sil. Odpovídá výslednice pohybu, který vidí chlapec ze svého pohledu?

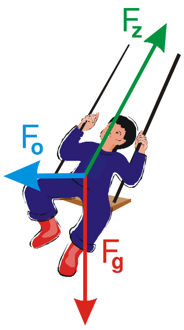
Na chlapce působí dvě síly:

- gravitační síla Země F_g svisle dolů,
- síla závěsu F_z, která působí ve směru řetězů, kterými je sedačka připevněna ke kolotoči.

Výslednici sil získáme jako součet gravitační síly a síly závěsu. Při pohledu z inerciální soustavy hraje výsledná síla roli síly dostředivé $\Rightarrow$ $F_v = F_d = m\frac{v^2}{r} = m\omega^2 r$.
Na chlapce působí směrem do středu výsledná síla o velikosti $F_v = m\omega^2 r$ $\Rightarrow$ chlapec by se měl zrychleně pohybovat ke středu kolotoče $\Rightarrow$ stejně jako u zrychlujících vztažných soustav ani u rotujících vztažných soustav neplatí Newtonovy zákony.

Př. 4: Navrhni řešení, které umožňovalo použít Newtonovy zákony pro vysvětlení pohybu chlapce i v případě, že se snaží popisovat svět ze svého pohledu (ze vztažné soustavy spojené s kolotočem).

Chlapec se vidí v klidu $\Rightarrow$ musí na něj působit nulová výsledná síla $\Rightarrow$ přidáme další sílu, která na chlapce působí směrem od středu kolotoče (odstředivá síla) a má velikost $F_s = F_d = m\frac{v^2}{r} = m\omega^2 r$ $\Rightarrow$ výsledná síla působící na chlapce je nulová a chlapec může setrvávat v klidu.



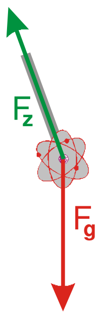
Pokud chceme popsat pohyb těles, která se otáčí s úhlovou rychlostí ω, ze vztažné soustavy, která je s nimi spojena, musíme kvůli neinerciálnosti této vztažné soustavy předpokládat, že na ně působí setrvačná odstředivá síla o velikosti $F_s = m\omega^2 r$ směrem od středu otáčení.

Předchozí věta v žádném případě neznamená rehabilitaci odstředivé síly ve smyslu, běžně používaném nefyziky. Odstředivá síla není pravou silou, používá se pouze při pozorování z neinerciální vztažné soustavy.

Př. 5: Auto zatáčí doleva. Jak se nakloní ozdoba zavěšená u předního skla? Vysvětli z pohledu inerciální vztažné soustavy i z pohledu neinerciální vztažné soustavy spojené s autem.

Ozdoba zavěšená u předního skla se nakloní doprava (od středu zatáčky). Vysvětlení závisí na volbě souřadné soustavy.

Pohled z inerciální vztažné soustavy (například strom vedle silnice)



Na přívěšek působí dvě síly:

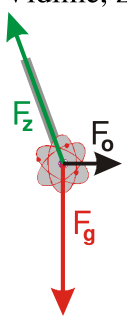
- gravitační síla Země F_g svisle dolů,
- síla závěsu F_z, která působí ve směru gumičky, kterou je přívěšek připevněn k oknu.

Obě síly nemají opačný směr $\Rightarrow$ jejich výslednice je nenulová, směřuje do středu zatáčky a hraje roli dostředivé síly $\Rightarrow$ její velikost je dána vztahem

$$F_v = F_d = m\frac{v^2}{r} = m\omega^2 r .$$

Pohled z neinerciální vztažné soustavy (osoby uvnitř auta)

Vidíme, že auto i s přívěskem stojí na místě (přívěsek je divně vykloněný).



Na přívěšek působí tři síly:

- gravitační síla Země F_g svisle dolů,
- síla závěsu F_z, která působí ve směru gumičky, kterou je přívěšek připevněn k onu
- setrvačná odstředivá síla F_0 směrem od středu zatáčky a o velikosti

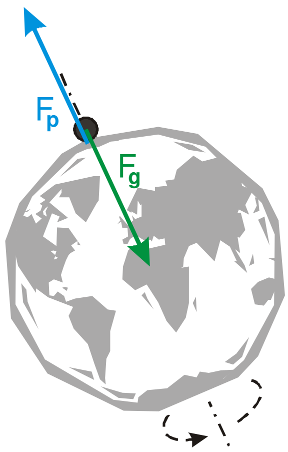
$$F_v = F_d = m\frac{v^2}{r} = m\omega^2 r .$$

Výslednice všech tří sil je nulová $\Rightarrow$ přívěšek může být v klidu.

Př. 6: Na podlaze leží železná koule. Porovnej velikost síly, kterou podlaha působí na kouli, pokud: a) koule se nachází na pólu b) koule se nachází na rovníku. Předpokládej, že poloměr Země i velikost její gravitační síly je v obou místech stejná. Příklad řeš z hlediska inerciální soustavy i z hlediska pozorovatele spojeného se Zemí.

Pohled z inerciální vztažné soustavy (vidíme, jak se Země otáčí okolo své osy)

a) koule se nachází na pólu

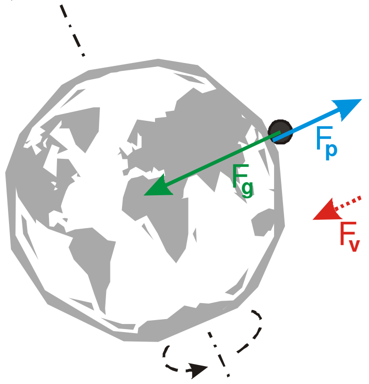


Na kouli působí dvě síly:

- gravitační síla Země F_g směrem do středu Země,
- síla podlahy F_p směrem od středu Země.

Koule stojí na místě $\Rightarrow$ výsledná síla působící na kouli musí být nulová $\Rightarrow$ $F_p = F_g$.

b) koule se nachází na rovníku



Na kouli působí dvě síly:

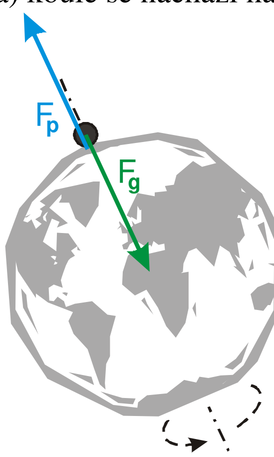
- gravitační síla Země F_g směrem do středu Země,
- síla stolu F_p směrem od středu Země.

Koule se otáčí se Zemí $\Rightarrow$ na kouli musí působit nenulová výsledná síla, která hraje roli dostředivé síly (směřuje do středu Země) $\Rightarrow$ $F_v = F_d = F_g - F_p$ $\Rightarrow$ $F_p = F_g - F_d$ $\Rightarrow$ síla podlahy je menší než gravitační síla.

$\Rightarrow$ Podlaha působí na kouli větší silou na pólu, protože část gravitační síly, kterou přitahuje Země kouli na rovníku se spotřebuje na „dostřeďování" koule během jejího otáčivého pohybu se Zemí.

Pohled z neinerciální vztažné soustavy spojené se Zemí (Země stojí)

a) koule se nachází na pólu

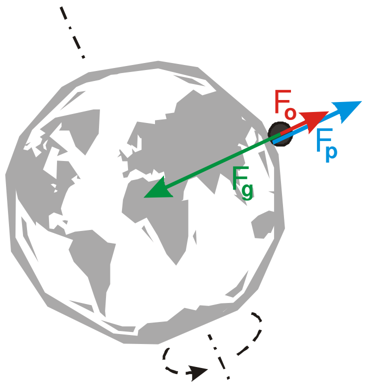


Na kouli působí dvě síly:

- gravitační síla Země F_g směrem do středu Země,
- síla podlahy F_p směrem od středu Země.

Koule stojí na místě $\Rightarrow$ výsledná síla působící na kouli musí být nulová $\Rightarrow$ $F_p = F_g$.

b) koule se nachází na rovníku



Na kouli působí tři síly:

- gravitační síla Země F_g do středu Země,
- síla stolu F_p směrem od středu Země,
- setrvačná odstředivá síla F_o směrem od středu Země.

Země i koule jsou v klidu $\Rightarrow$ na kouli musí působit nulová výsledná síla $\Rightarrow$ $F_v = 0 = F_g - F_p - F_0$ $\Rightarrow$ $F_p = F_g - F_o$ $\Rightarrow$ síla podlahy je menší než gravitační síla.

$\Rightarrow$ Podlaha působí na kouli větší silou na pólu, protože část gravitační síly, kterou přitahuje Země kouli na rovníku je vyrušena setrvačnou odstředivou silou způsobenou rotací Země a pohledem z neinerciální vztažné soustavy s ní spojené.

V obou vztažných soustavách jsme dospěli ke stejnému výsledku: síla, kterou působí podlaha na kouli je na rovníku menší než na pólu, protože část gravitační síly:
a) se „spotřebuje na dostřeďování“ koule při jejím otáčivém pohybu se Zemí,
b) je vyrušena setrvačnou odstředivou silou.

Př. 7: Urči rozdíl mezi velikostí sil zkoumaných v předchozím příkladu. Poloměr Země je 6378 km. Hmotnost koule je 7,257 kg.

Rozdíl mezi silou podlahy na pólu a na rovníku způsobuje potřeba dostředivé síly (působení odstředivé síly při pohledu z neinerciální soustavy Země) $\Rightarrow$ stačí určit velikost této síly.

$$F_o = F_d = m\frac{v^2}{r} = m\omega^2 r$$

Úhlová rychlost Země: $\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{24 \cdot 3600}\ \text{rad/s} = 7{,}27 \cdot 10^{-5}\ \text{rad/s}$.

Rozdíl mezi silami $F_s = m\omega^2 r = 7{,}257 \cdot \left(7{,}27 \cdot 10^{-5}\right)^2 \cdot 6378000\ \text{N} = 0{,}24\ \text{N}$.

Gravitační síla Země na kouli: $F_g = mg = 7{,}257 \cdot 10\ \text{N} = 72{,}57\ \text{N}$

Rozdíl mezi oběma silami není vzhledem k velikosti gravitační síly příliš velký.

Dodatek: Část gravitační síly se na udržení koule v otáčivém pohybu se Zemí spotřebuje i na všech ostatních místech povrchu Země. Velikost této části je mimo rovník menší (protože je menší vzdálenost takového místa od osy otáčení Země). Protože při manipulaci nevnímáme přímo gravitační sílu Země, ale tu její část, která zbude po zajištění odstřeďování, zdá se nám, že předměty jsou na rovníku přitahovány méně. Tento zbytek z gravitační síly je pak nazývám tíhová síla. Jak jsme si ale ukázali v předchozím příkladu, je rozdíl mezi gravitační a tíhovou silou velmi malý a proto ho v učebnici zanedbáváme. Více budeme o problematice mluvit ještě v kapitole o gravitačním poli.

Př. 8: Navrhni, jak by se řešení předchozích příkladů dalo využít při stavbě kosmodromů.

Na rovníku je část gravitační síly spotřebovávána na udržení předmětů na kruhové dráze otáčení Země $\Rightarrow$ potřebujeme menší sílu na zvedání předmětů $\Rightarrow$ je snazší dopravit raketu na oběžnou dráhu $\Rightarrow$ je výhodné stavět kosmodromy co nejblíže u rovníku.

Úvaha se opravdu využívá v praxi: Rusko (kosmodrom Bajkonur v Kazachstánu), USA (základna Cape Canaveral na Floridě), Francie a Evropská kosmická agentura (kosmodrom Kourou ve Francouzské Guyaně v Jižní Americe).
Ke stejném závěru dojdeme i tím, že si uvědomíme, že díky otáčení Země mají předměty na rovníku nejvyšší obvodovou rychlost a tím i největší tendenci pokračovat v rovnoměrném přímočarém pohybu a odletěl tak do vesmíru.

Pedagogická poznámka: Zadání příkladu 8 ukazuji na poslední chvíli. Často se stává, že při řešení příkladu 6 někoho zadání i s řešením napadne zcela bez popostrčení ze strany učitele.

Shrnutí: Problémy při popisu otáčejících se předmětů z neinerciální soustavy spjaté s otáčejícím se předmětem, můžeme vyřešit dodáním setrvačné odstředivé síly a o velikosti $F_o = F_d = m\frac{v^2}{r} = m\omega^2 r$.