

### 1.3.5 Dynamika pohybu po kružnici I

**Předpoklady:** 1304

Při pohybu po kružnici je výhodnější popisovat pohyb pomocí úhlových veličin, které korespondují s normálními veličinami, které jsme používali dříve.

normální veličiny	pojítka	úhlové veličiny
dráha $s$ [m]	$s = \varphi r$	úhel $\varphi$ [rad]
rychlost $v$ [m/s] $v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$	$v = \omega r$	úhlová rychlost [rad/s] $\omega = \frac{\Delta \varphi}{\Delta t}$
zrychlení $a$ [m/s <sup>2</sup> ] $a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$	$a = \varepsilon r$	úhlové zrychlení [rad/s <sup>2</sup> ] $\varepsilon = \frac{\Delta \omega}{\Delta t}$
<b>rovnoměrný pohyb</b>		<b>rovnoměrný pohyb po kružnici</b>
$v = \text{konstanta}$		$\omega = \text{konstanta}$
$s = s_0 + vt$		$\varphi = \varphi_0 + \omega t$
<b>rovnoměrně zrychlený pohyb</b>		<b>rovnoměrně zrychlený pohyb po kružnici</b>
$a = \text{konstanta}$		$\varepsilon = \text{konstanta}$
$v = v_0 + at$		$\omega = \omega_0 + \varepsilon t$
$s = s_0 + v_0 t + \frac{1}{2} at^2$		$\varphi = \varphi_0 + \omega_0 t + \frac{1}{2} \varepsilon t^2$

Zatím jsme se u kruhového pohybu zabývali pouze kinematikou (popis pohybu). Nedotkli jsme se dynamiky (popisu příčin pohybu).

Dynamika přímočarého pohybu:

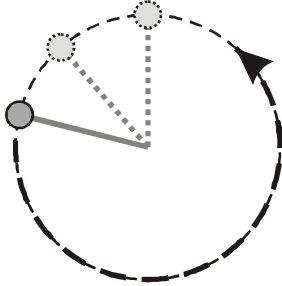
1. Newtonův zákon: Těleso, na které působí nulová výsledná síla, se (v inerciální soustavě souřadnic) pohybuje rovnoměrně přímočaře.

2. Newtonův zákon:  $a = \frac{F}{m}$  (Kde je síla, tam je zrychlení.)

**Př. 1:** Na obrázku je nakreslena při pohledu shora kulička položená na stole a přidělaná k niti. Nit je na druhém konci připevněná a kulička se tak okolo tohoto bodu ve vodorovném rovině rovnoměrně otáčí.

- Jaké jsou při tomto pohybu hodnoty úhlového zrychlení  $\varepsilon$  a tečného zrychlení  $a_t$ ?
- Nakresli do obrázku síly, které působí na kuličku v každém ze zachycených okamžiků, a jejich výslednici. Tření zanedbej.

c) Nakresli do obrázku ke každé zachycené poloze kuličky její vektor rychlosti.

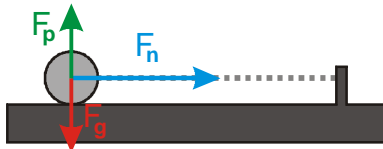


a) Hodnoty úhlového zrychlení  $\varepsilon$  a tečného zrychlení  $a_t$ :

rovnoměrný pohyb po kružnici  $\Rightarrow \varepsilon = 0$

$$a_t = \varepsilon \cdot r \Rightarrow a_t = 0$$

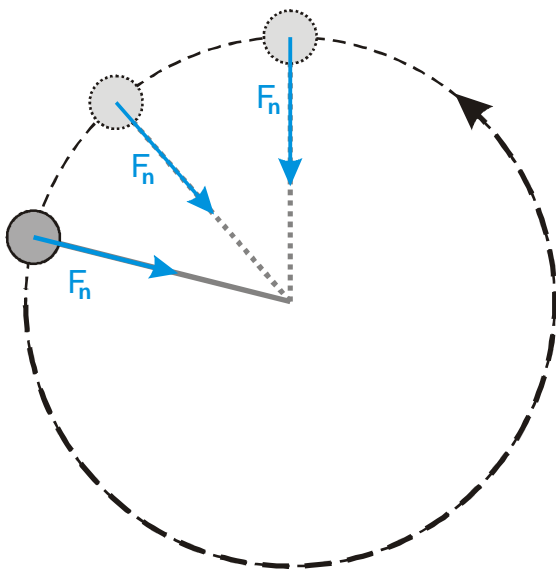
b) Síly, které působí na kuličku



Při pohledu z bodu je vidět, že na kuličku působí tři síly:

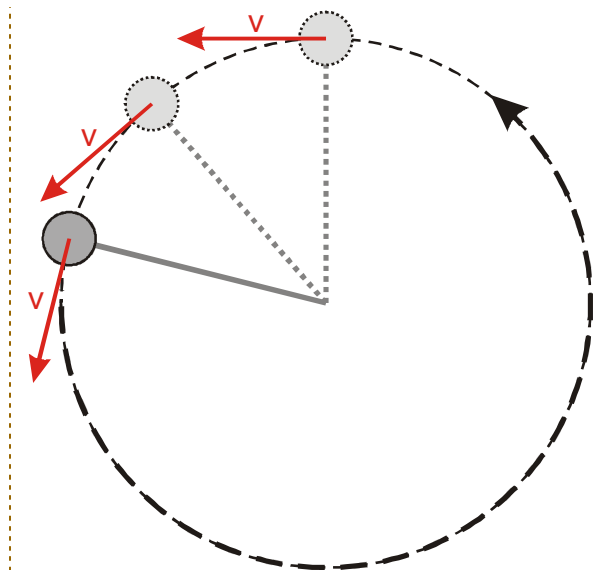
- gravitační síla  $F_g$  směrem dolů
- síla podložky  $F_p$  směrem nahoru (stejně velká jako gravitace)
- síla provázku  $F_p$  vodorovně v každém okamžiku ve směru k místu upevnění provázku

protože síly  $F_g$  a  $F_p$  mají opačný směr a stejnou velikost, v každém okamžiku se výsledná síla rovná síle  $F_p$



$\Rightarrow$  kulička by se měla pohybovat se zrychlením, které má v každém okamžiku směr kolmý ke směru jejího pohybu

c) Nakresli do obrázku ke každé zachycené poloze kuličky její vektor rychlosti.



Velikost rychlosti zůstává stále stejná  $\Rightarrow$  tečné zrychlení  $a_t$  musí být nulové

Směr vektoru rychlosti se neustále mění  $\Rightarrow$  kulička se pohybuje se zrychlením, které je v každém okamžiku kolmé na směr jejího pohybu (směřuje tedy k místu upevnění provázku). Kdyby libovolně malá část vektoru zrychlení měla stejný směr jaký má vektor rychlosti, změnila by se velikost rychlosti (a kulička by se již nepohybovala rovnoměrným pohybem po kružnici)

Jak silovým rozbořem tak sledováním vektoru rychlosti jsme dospěli ke stejnému závěru: Předmět, který se pohybuje rovnoměrným kruhovým pohybem se pohybuje s **normálovým zrychlením**  $a_n$ .

Normálové zrychlení:

- je v každém okamžiku kolmé na směr pohybu
- nemění velikost rychlosti, ale pouze její směr
- způsobuje **dostředivá síla**. Dostředivá síla působí směrem do středu k ose otáčení.

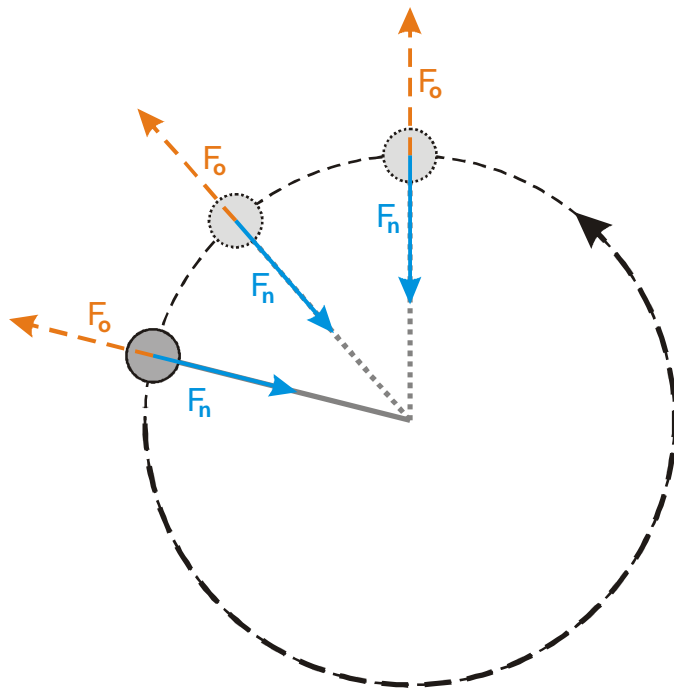
**POZOR:** Dostředivá síla není žádným novým typem síly. Jde o roli, kterou mohou hrát síly různého původu (analogie pro studenty: Do třídy chodí různí studenti (stejně tak existují různé druhy sil – gravitační, třecí, ...), každý z těchto studentů může hrát roli služby (stejně tak může roli dostředivé síly hrát v různých situacích každá ze zmiňovaných sil).

**Př. 2:** Najdi důvody proč, nemůžeme do silového rozboru nakreslit odstředivou sílu.

Odstředivá síla nesplňuje požadavky na sílu:

- nemůžeme nalézt původce
- nemůžeme nalézt partnerskou sílu

Zkusíme si odstředivou sílu nakreslit do obrázku:



Záleželo by na vzájemné velikost odstředivé síly a síly dostředivé (v konkrétním případě síly nitě), pokud platilo:

- $F_o < F_n \Rightarrow$  výsledná síla by byla menší a nedokázala by kuličce udělit dostatečné normálové zrychlení
- $F_o = F_n \Rightarrow$  výsledná síla by byla nulová a kulička by se musel pohybovat rovnoměrně přímočaře
- $F_o > F_n \Rightarrow$  výsledná síla by směřovala od středu otáčení a kulička by zatáčela na druhou stranu než ve skutečnosti

**Př. 3:** Vysvětli, proč je člověk na kolotoči nebo při průjezdu zatáčkou tlačěn směrem z kruhu.

Z předchozího víme, že tento efekt nemůže způsobovat odstředivá síla, protože žádná neexistuje.

Pohybující se člověk má tendenci se pohybovat rovnoměrně přímočaře (podle zákona setrvačnosti)  $\Rightarrow$  snaží se pohybovat rovně a nechce samovolně zatáčet. K zatáčení ho donutí jediné síla, která působí směrem do středu:

- na kolotoči síla sedačky, na kterou jsme se natlačili díky setrvačnému pohybu po přímce (a tedy od středu otáčení)
- v automobilu síla bočních dveří, síla pásu nebo boční strany sedačky, na které se natlačíme díky setrvačnému pohybu po přímce

**Pedagogická poznámka:** Předchozí dva příklady jsou velmi důležité. Pokud chcete dosáhnout toho, aby studenti vnímali fyziku jako vědu o reálném světě, musíte je přesvědčit o tom, že odstředivá síla neexistuje (a ona skutečně neexistuje).

Neexistenci odstředivé síly si můžeme ukázat i pokusem. Těžkou ocelovou kuličku roztočíme na kopírovacím papíru (na tvrdé podložce) a nit pustíme. Z okopírované stopy je zcela zřejmé, že se kulička od okamžiku puštění pohybuje po tečně (tedy stejně jako by na ní působila pouze gravitace a stůl).

Na předměty pohybující se po kružnici nepůsobí odstředivá síla. Odstředivá síla neexistuje, její existence by znamenala neplatnost základních fyzikálních zákonů a totální krach fyziky jako takové.

**Dodatek:** Termín odstředivá síla se bohužel ve školské fyzice používá při popisujících dějů z pohledu pozorovatele, který se otáčí a zároveň si představuje, že stojí na místě (ve většině případů jde o počínání zjevně absurdní). I v tomto případě je však nutné odstředivou sílu jakožto zdánlivou sílu striktně odlišovat od pravých, o kterých jsme mluvili dosud, protože nesplňuje požadavky kladené na sílu a její existence závisí na místě odkud děj pozorujeme.

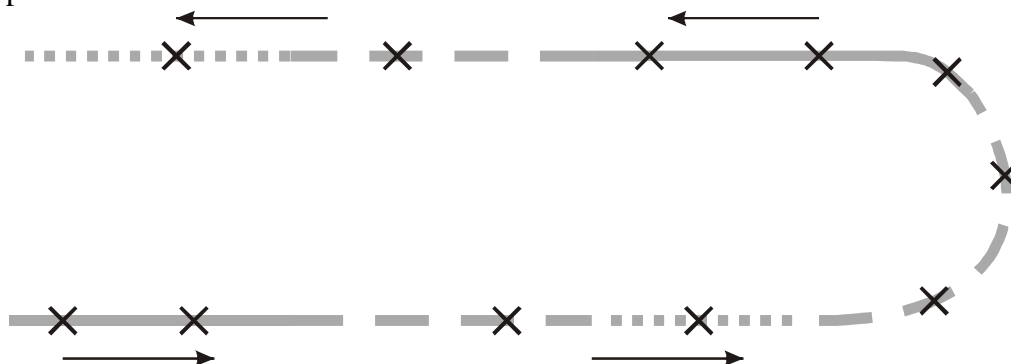
Z didaktického hlediska je její zavádění zjevně zcela kontraproduktivní, protože vede k tomu, že naprostá většina studentů (určitě přes 95 %) špatně chápe pohybové zákony. Více v následující kapitole 4 – Inerciální a neinerciální soustavy.

Použití termínu odstředivá síla mimo fyziku (odstředivka, působení odstředivé síly při jízdě obloukem, ...) v naprosté většině vychází ze špatného pochopení fyzikálního použití termínu, protože se všechny tyto děje popisují z hlediska vnějšího pozorovatele (tedy z inerciální souřadné soustavy) a v takovém případě o žádné odstředivé síle mluvit nemůžeme.

Jak funguje ždímačka (odstředivka)?

Rozhodně v ní nepůsobí žádná odstředivá síla. Ždímačka pouze roztočí buben s prádlem. Podle 1. Newtonova zákona by prádlo v bubnu chtělo letět rovně (po tečně), v tom mu však brání stěna bubnu. Stejným (tečným) směrem by chtěla letět i voda v prádla a na rozdíl od prádla tak dokonce i letět může, protože v bubnu jsou malé díry. Že voda odlétá po tečně a ne od středu, si můžeme snadno ověřit při máchnutí namočenou houbou.

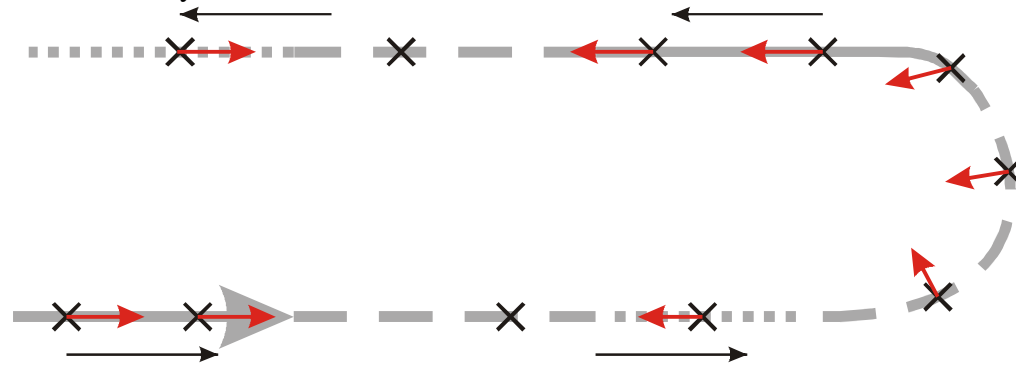
**Př. 4:** Na obrázku je nakreslena trajektorie automobilu na části závodní dráhy. Automobil dráhy projel vyznačeným směrem. Plná čára znamená, že v daných místech automobil zrychloval, čárkovaná čára znamená rovnoměrný pohyb a tečkovaná zpomalování. Nakresli do míst označených křížky vektor výsledné síly, která působila na automobil.



V přímočaré části trati závisí vektor výsledné síly pouze na tom, zda auto zrychluje nebo zpomaluje  $\Rightarrow$

- zrychlený pohyb  $\Rightarrow$  výsledná síla má stejný směr jako jízda automobilu
- rovnoměrný pohyb  $\Rightarrow$  výsledná síla je nulová
- zpomalený pohyb  $\Rightarrow$  výsledná síla má opačný směr než jízda automobilu

V křivočaré části trati musí mít výsledná síla ještě dostředivou část, která zajistí automobilu normálové zrychlení nutné k udržení na trati.

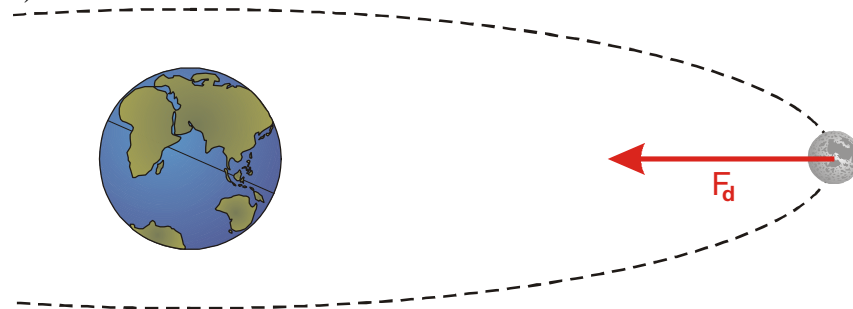


**Pedagogická poznámka:** U tohoto příkladu je nutné nechat studenty, aby si výslednici do obrázku nakreslili opravdu sami. Budete překvapeni, kolik z nich je nakreslí špatně. V první fázi neříkám, jak má být správné řešení, ale radím, aby si vzpomněli na dosavadní průběh hodiny.

**Př. 5:** Najdi síly, které hrají roli dostředivé síly v následujících pohybech:

- Měsíc obíhá kolem Země
- auto projíždí zatáčkou
- sáňkař projíždí klopenou zatáčkou sáňkařské dráhy
- točíme kuličkou na provázku ve svislé poloze, zajímáme se o nejnižší bod její trajektorie
- točíme kuličkou na provázku ve svislé poloze, zajímáme se o nejvyšší bod její trajektorie

a) Měsíc obíhá kolem Země

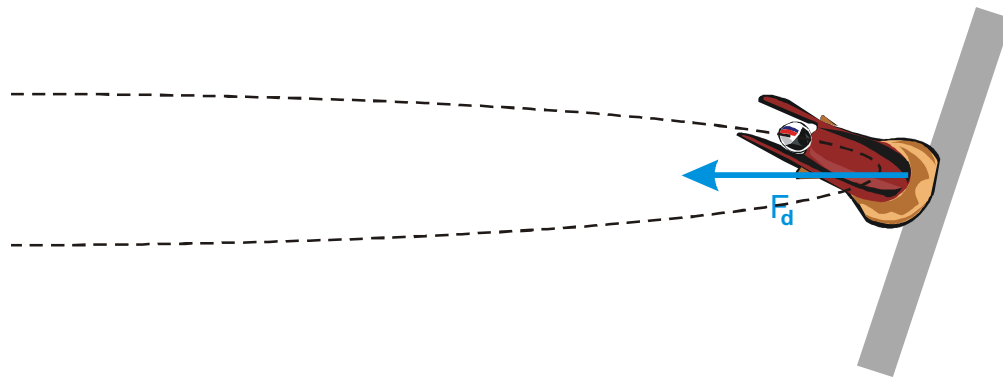


Roli dostředivé síly hraje gravitační síla  $F_g$ , kterou Země přitahuje Měsíc

b) auto projíždí zatáčkou

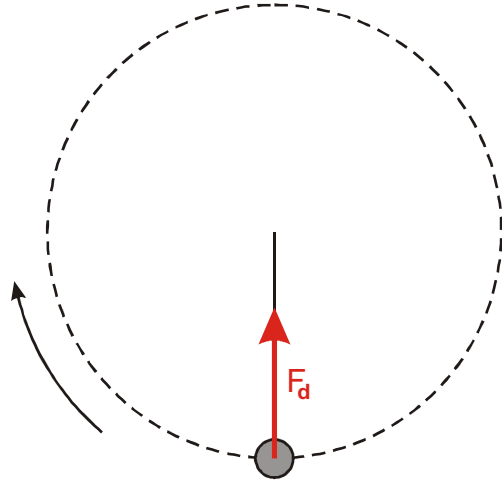
Roli dostředivé síly hraje tření mezi koly a vozovkou (proto při náledí, když je tření velmi malé auta nemohou zatáčet a pokračují rovnoměrně přímočaře mimo vozovku).

c) sáňkař projíždí klopenou zatáčkou sáňkařské dráhy



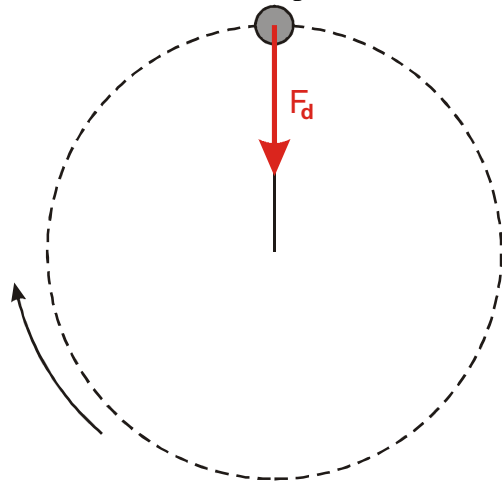
Roli dostředivé síly hraje z větší části tlaková síla podložky, z menší části tření.

d) točíme kuličkou na provázku ve svislé poloze, zajímáme se o nejnižší bod její trajektorie



Roli dostředivé síly hraje část síly, kterou na kuličku působí provázek (další část této síly vyrovnává působení gravitace).

e) točíme kuličkou na provázku ve svislé poloze, zajímáme se o nejvyšší bod její trajektorie



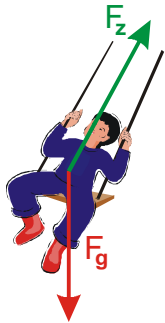
Roli dostředivé síly hraje gravitační síla. Buď pouze částečně (když se kulička točí rychle) nebo zcela, pokud je pohyb kuličky příliš pomalý zatočí gravitace trajektorii kuličky příliš a ta do nejvyššího bodu vůbec nevystoupá.

Řešení předchozích dvou bodů si snadno můžeme vyzkoušet, když ve svislém směru roztočíme libovolný předmět. Ucítíme, že v nejnižším bodě nás provázek táhne nejvíce (síla

provázku zajišťuje dostředivou sílu i vyrušení gravitace), v nejvyšším bodě naopak nemusí táhnout vůbec (při vhodné rychlosti gravitace zajistím celou dostředivou sílu).

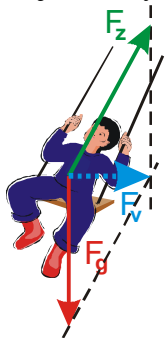
**Př. 6:** Vysvětli, proč se sedačky na řetízkovém kolotoči během jízdy vychýlí ze svislého směru. Jak vzniká dostředivá síla, nutná k udržení sedačky na kruhové dráze? Jak souvisí vychylka s rychlostí otáčení?

Nakreslíme si síly, které působí na člověka na sedačce kolotoče:



- $F_g$  - gravitační síla Země působící kolmo dolů
- $F_z$  - taková síla závěsu působící ve směru řetězů, musí mít takovou velikost, aby její svislá složka vyrušila sílu  $F_g$  (sedačka nespadá dolů)

Najdeme výslednici těchto dvou sil:



Výsledná síla má pouze vodorovnou složku, která směřuje do středu kolotoče  $\Rightarrow$  hraje roli dostředivé síly.

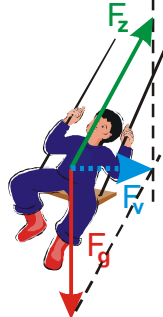
Nakreslíme si situaci pro různé vychylky sedačky od svislého směru:

Kolotoč stojí, sedačka je svislá



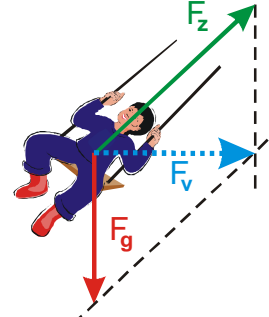
nulová výsledná síla  
odpovídá faktu, že se sedačka nepohybuje

Kolotoč se roztáčí, sedačka je málo nakloněná



malá výsledná síla  
odpovídá faktu, že se sedačka se pohybuje pomalu a je třeba malá dostředivá síla

Kolotoč se točí rychle, sedačka je hodně nakloněná



velká výsledná síla  
odpovídá faktu, že se sedačka se pohybuje rychle a je třeba velká dostředivá síla

výsledek odpovídá zkušenosti, čím rychleji se kolotoč točí, tím větší je vychylka sedačky, tím větší vzniká výsledná síla, která hraje roli dostředivé síly, která udržuje sedačku na kruhové dráze

Na konci hodiny si ještě ujasníme, co znamená „beztížný stav“.

Beztížný stav si spojujeme se záběry posádek kosmické lodi, které se volně vznášejí uvnitř lodě stejně jako veškeré vnitřní vybavení.

Beztížný stav neznamena, že na předmět nepůsobí gravitační síla (všechny předměty na oběžné dráze přitahuje Země).

Beztížný stav můžeme realizovat i v letadle, které necháme padat volným pádem k zemi.

Proč se v takové situaci začne zdát, že na předměty v letadle nepůsobí gravitace?

Letadlo i předměty v něm padají se stejným zrychlením  $g$ , na toto zrychlování se spotřebuje celá gravitační síla a žádný z předmětů tak nemusí působit žádná další síla, aby zůstal v klidu vůči zbytku letadla.

(Dokud letadlo letí ve stejné výšce, musíme v letadle sedět na sedačce, která na nás působí silou, která vyruší gravitaci. Stejně tak mi musíme držet silou igelitovou tašku, aby nepadla na podlahu. Jakmile začne letadlo padat volným pádem, igelitka začne padat s ním a nemusíme na ni působit žádnou silou. Zdá se nám, že na ní nepůsobí zemská tíže.)

Stejná situace nastává na oběžné dráze. Všechny předměty v kosmické lodi celá gravitační síla drží na oběžné dráze a nemusí tak na ně působit žádná další síla, aby zůstali vůči lodi v klidu.

**Shrnutí:** Předměty, které se pohybují rovnoměrným pohybem po kružnici se pohybují se zrychlením (mění se směr jejich rychlosti) a musí tedy na ně působit výsledná dostředivá síla.