

# Síla



Přednášející:

RNDr. František Adamec, CSc.

Ústav fyziky a biofyziky JČU v Českých Budějovicích

Na základě učebnic:

Halliday, Resnick

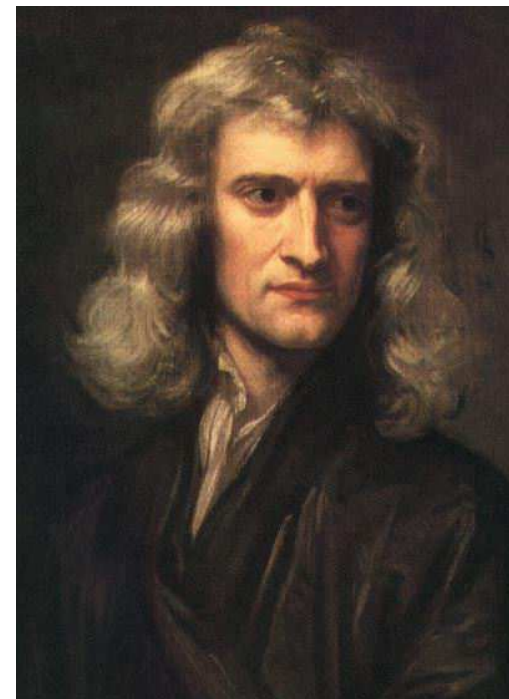
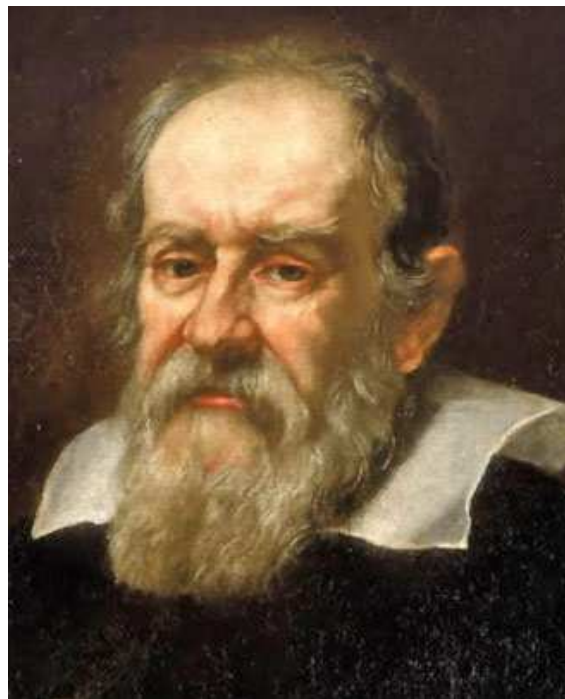
Fundamentals of Physics 8<sup>th</sup> Edition, Wiley 2005

Feynman, Leighton, Sands

Feynmanovy přednášky z fyziky

Fragment 2000

**Co je příčinou změn směru a rychlosti pohybu, tvaru těles?**



## Síla a pohyb

**Aristotelés ze Stageiry** 384 př. n. l. - 322 př. n. l.

Každému tělesu je vlastní nějaké místo v prostoru, lehčí jsou na hoře těžší pak leží níže. Tělesa mají tendenci zaujímat trvale tato místa a proto k těmto místům směřují. Takový pohyb je přirozený, ostatní pohyby jsou násilné, příčina násilných pohybů je síla (vnější vliv).

**Galileo Galilei** 15.2.1564 - 8.1.1642

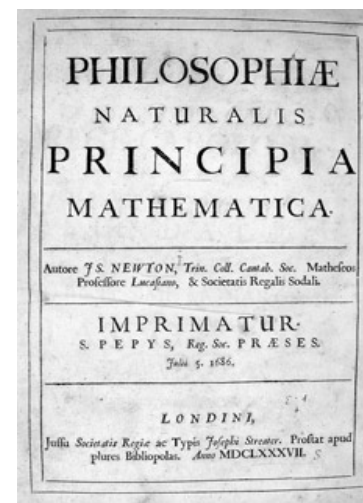
Není třeba vysvětlovat pohyb samotný a jeho příčinu, ale pouze jeho změnu.

Zachování rychlosti a směru pohybu je projevem **setrvačnosti tělesa**, tedy odporu ke změně pohybového stavu tělesa (**hybnosti**).

### Newtonovy pohybové zákony

(Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica, Isaac Newton 5. července 1687):

1. Zákon setrvačnosti
2. Zákon síly
3. Zákon akce a reakce



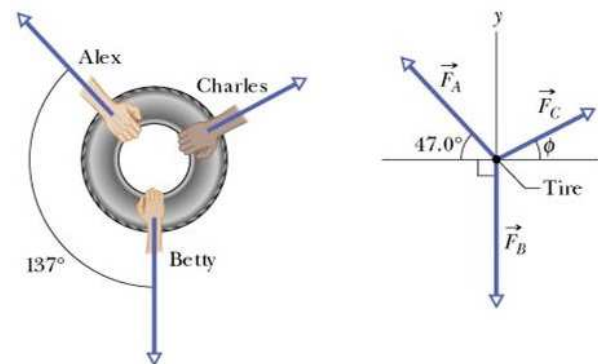
## I. Zákon setrvačnosti

Těleso setrvává ve stavu klidu nebo rovnoměrného přímočarého pohybu, pokud není vnějšími vlivy nuceno tento stav změnit. Je zopakováním Galileova principu **setrvačnosti**.

Tělesa mění svůj pohybový stav pouze pod vlivem vnějšího působení, **síly**. Bez působení síly se pohybový stav těles nemění, těleso se pohybuje rovnoměrně to tzn. beze změny rychlosti a přímočaře, a nebo zůstává ve stavu klidu.

Působí-li na těleso současně více sil v různých směrech, pak se směr pohybu tělesa změní ve směru výslednice působících sil – **princip superpozice**.

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i$$



**Inerciální souřadná soustava - platnost Newtonových zákonů.**

Newtonovy zákony platí pouze v souřadných soustavách (ss), které jsou buď v klidu, nebo se pohybují rovnoměrným přímočarým pohybem. Pouze v těchto ss platí druhý a třetí Newtonův zákon. Tyto ss označujeme pojmem **inerciální souřadné soustavy**.

## II. Zákon síly

Časová změna **hybnosti** tělesa je úměrná působící síle (výslednici vektorového součtu všech sil současně působících na těleso) a má s ní stejný směr.

Hybnost tělesa hmotnosti  $m$  pohybujícího se rychlostí  $\vec{v}$ :

$$\vec{p} = m\vec{v}$$

Fyzikálně správný tvar druhého Newtonova zákona:

$$\frac{d}{dt} \vec{p} = \vec{F}$$

Rozepsáním derivace hybnosti dostaneme vztah z něhož  $\frac{d}{dt} \vec{p} = \frac{d(m\vec{v})}{dt} = \frac{dm}{dt} \vec{v} + m \frac{d}{dt} \vec{v} = \vec{F}$

za předpokladu neměnné hmotnosti tělesa tj.:  $\frac{dm}{dt} = 0$

vyplývá známá formulace zákona síly:

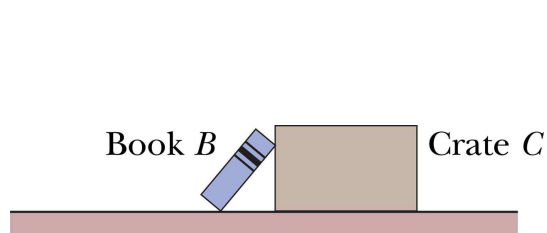
$$\frac{d\vec{p}}{dt} = m\vec{a} = \vec{F}$$

Zákon síly tedy říká, že změna pohybového stavu (rychlosti a směru) tělesa charakterizovaného hybností tělesa je úměrná působící síle. Konstantou úměrnosti je **hmotnost tělesa** - **setrvačná hmotnost**.

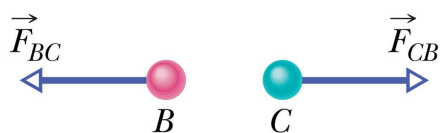
V mezinárodní soustavě jednotek SI je jednotkou síly **1 Newton = 1 N = 1kgms<sup>-2</sup>**.

### III. Zákon akce a reakce

Každá akce vyvolá vždy stejně velkou reakci opačného směru, vzájemné síly mezi dvěma tělesy mají vždy stejnou velikost a opačný směr:

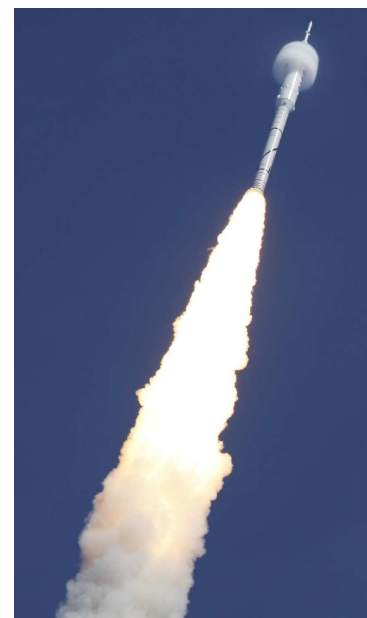


(a)



(b)

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$$



Důsledkem platnosti zákona akce a reakce je zákon zachování hybnosti. Příkladem platnosti III. NZ je raketový motor (Ares 1, NASA.)

## Zákon zachování hybnosti.

Mějme dvě interagující částice o hmotnostech  $m_1$  a  $m_2$ . Síly, které mezi těmito částicemi působí jsou stejné a opačně orientované, pak podle zákona síly je síla rovna časové změně hybnosti a proto platí:

$$\frac{d}{dt} \vec{p}_1 = -\frac{d}{dt} \vec{p}_2$$

Je-li tedy rychlost změny vždy stejná a opačná, pak celková změna hybnosti první částice je stejná a opačná než celková změna hybnosti druhé částice. To znamená, že celková časová změna hybnosti izolované soustavy dvou interagujících částic je nulová:

$$\frac{d(\vec{p}_1 + \vec{p}_2)}{dt} = 0$$

Součet  $(\vec{p}_1 + \vec{p}_2) = (m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2) = \text{konst.}$  označujeme jako **celkovou hybnost** dvou částic.

Rozšíření na izolovanou soustavu mnoha částic:

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \vec{p}_3 + \dots = m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 + m_3\vec{v}_3 + \dots = \text{konst.}$$

## Diskuse sil.

K tomu, abychom využili Newtonovy zákony je třeba znát podstatu a charakteristiky fyzikálních sil a jejich matematické vyjádření. Historicky první diskuse o podstatě působící síly je **Newtonův gravitační zákon**.

### Newtonův gravitační zákon

Sílu působící mezi dvěma hmotným tělesy o hmotnostech  $m$  a  $M$  ležícími ve vzdálenosti  $r$  popisuje Newtonův gravitační zákon:

$$\vec{F} = G \frac{mM}{|\vec{r}|^2} \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|}$$

$G$  je gravitační konstanta.

Hmotnosti těles  $m$  a  $M$  v gravitačním zákoně nazýváme **gravitační hmotnosti**. Ze všech dosud provedených experimentů vyplývá, rovnost gravitační a setrvačné hmotnosti.

Uvažujeme-li pohyb tělesa o hmotnosti  $m$  v blízkosti Země (hmotnost země  $M$ ) pak Newtonův gravitační zákon přepíšeme do tvaru:

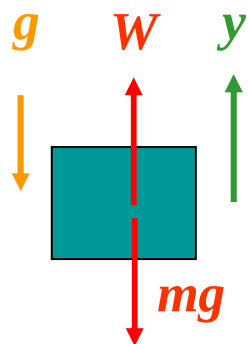
$$\vec{F} = G \frac{mM}{|\vec{r}|^2} \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|} = m \left( G \frac{M}{|\vec{r}|^2} \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|} \right) = m\vec{g}$$

$\vec{g}$  je gravitační zrychlení:

$$\vec{g} = G \frac{M}{|\vec{r}|^2} \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|}$$

### Tíha ( $W$ )

Síla, kterou musíme působit na těleso, abychom zabránily tělesu ve volném pádu.



$$F_{\text{net},y} = ma_y = W - mg = 0 \rightarrow W = mg$$

Vážení těles – porovnáváme tíhu tělesa ( $L$ ) s tíhou standardu (reference  $R$ ).

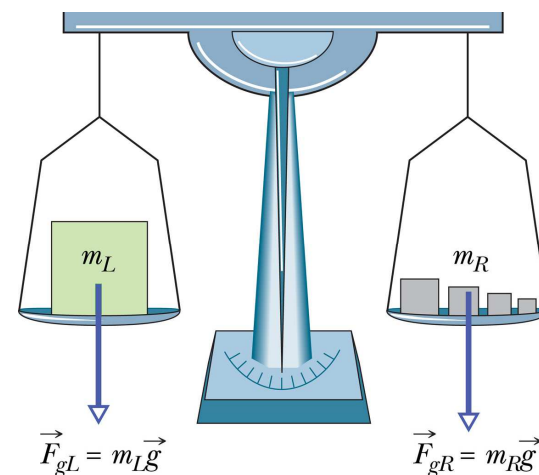
Z platnosti vztahu:  $\vec{F}_{gL} = m_L \vec{g} = m_R \vec{g} = \vec{F}_{gR}$

vyplývá rovnost:

$$m_L = m_R$$

**Pozor!**

Tíha a hmotnost nejsou obecně stejné! Termín hmotnost používáme ve smyslu míry setrvačnosti tělesa.



## Normálová síla

Normálová síla  $\mathbf{F}_N$  je síla působící ve směru kolmém k povrchu tělesa.

Příklad: Blok hmotnosti  $m$  ležící na stole.  $\mathbf{F}_N$  je normálová síla,  $\mathbf{F}_g$  je tíha bloku.

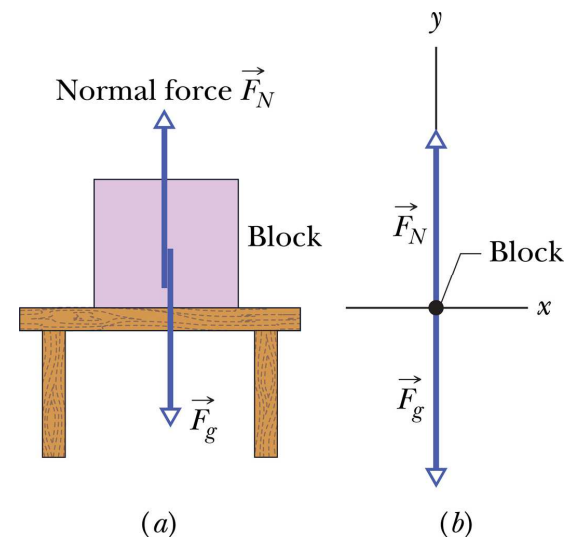
$$\vec{F}_N - \vec{F}_g = m\vec{a}_y$$

$$\vec{F}_N - m\vec{g} = m\vec{a}_y$$

$$\vec{F}_N = m\vec{a}_y + m\vec{g} = m(\vec{a}_y + \vec{g})$$

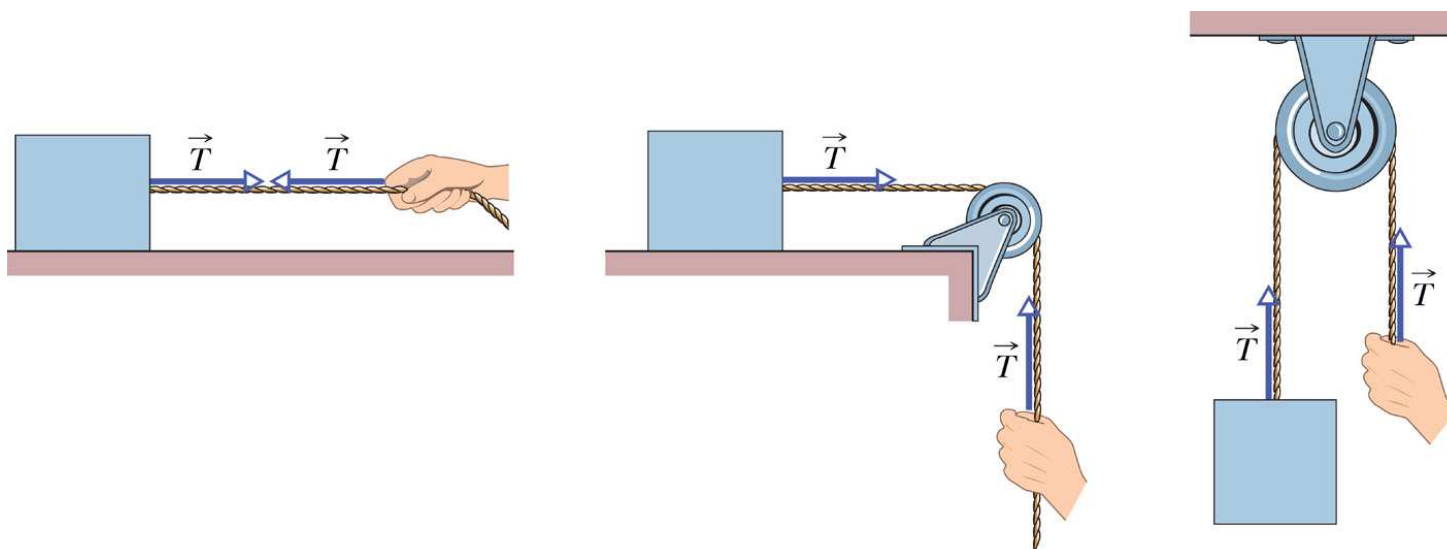
$$\vec{a}_y = 0$$

$$\vec{F}_N = m\vec{g}$$



## Napětí

Sílu působící v napnutém nebo stlačeném tělese označujeme termínem napětí. Lano na obrázku je napnuté, v důsledku napětí, které v laně vzniká táhneme-li těleso k němuž je lano připevněno.



## Tření

Při pohybu tělesa taženého po povrchu jiného tělesa, dochází ke ztrátám energie, tělesa se v místě vzájemného kontaktu zahřívají. Mechanismus ztráty energie souvisí s deformací drobných nerovností na povrchu smýkaných těles.

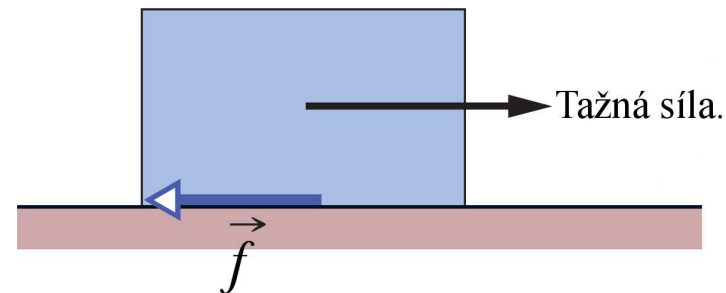
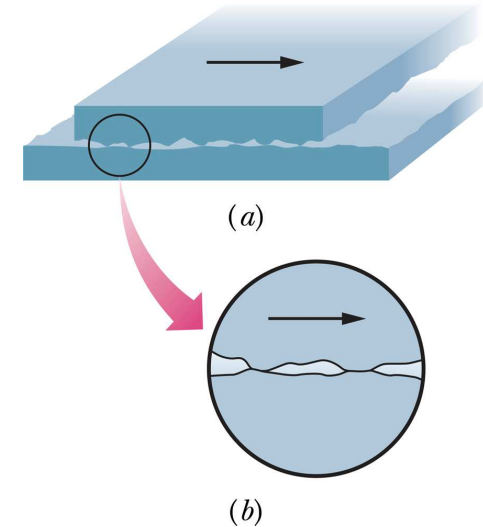
V důsledku těchto deformací vznikají v blízkosti styku smýkaných těles kmity v atomární struktuře obou těles a tedy ke vzniku tepla.

Síla, kterou musíme vynaložit k překonání síly tření je dána empirickým vztahem:

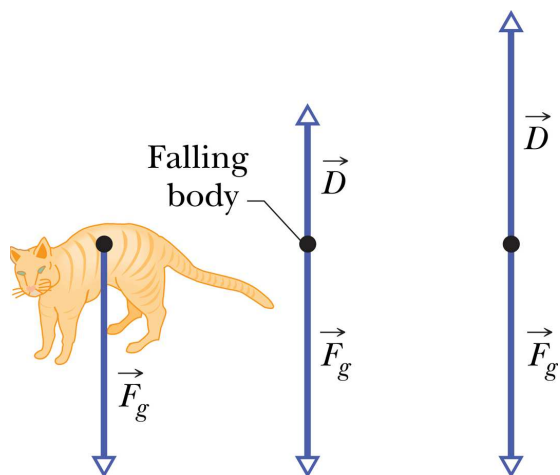
$$\vec{f} = \mu \vec{N}$$

$\mu$  je **koeficient smykového tření**

$N$  kolmá složka síly (tíhy) k povrchu



## Pohyb tělesa v odporujícím prostředí



Kočka padající volným pádem je urychlována gravitační silou se zrychlením  $g$  až do okamžiku, kde je gravitační síla  $F_g$  rovna brzděné síle  $D$ .

Těleso pohybující se v odporujícím tekutém prostředí je bržděno silou působící proti směru pohybu tělesa. Velikost této brzděné síly je dána empirickým vztahem:

$$D = \frac{1}{2} C \rho A v^2$$

kde  $C$  je experimentálně zjištěný koeficient,  $\rho$  je hustota a  $A$  je efektivní průřez tělesa (průmět plochy tělesa do směru kolmého ke směru vektoru rychlosti).

Maximální rychlost (terminální rychlost  $v_t$ ), které může těleso pohybující se v tekutém odporujícím prostředí dosáhnout vyplývá z rovnic:

$$D - F_g = ma$$

$$\frac{1}{2} C \rho A v_t - F_g = 0$$

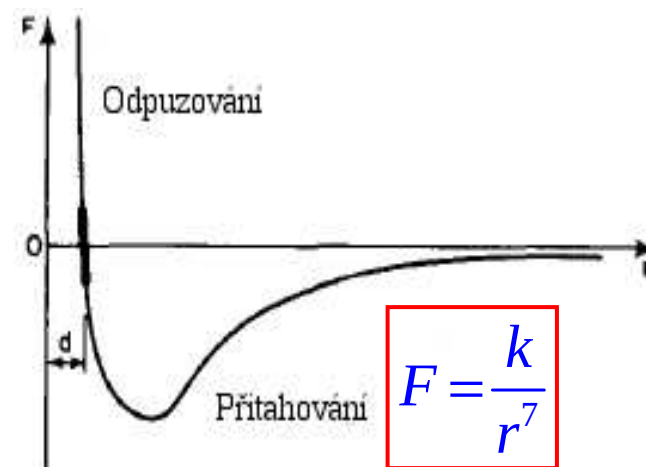
$$v_t = \sqrt{\frac{2F_g}{C\rho A}}$$

## Molekulové síly- síly mezi atomy

U nepolárních molekul, (všechny elektrické síly jsou vykompenzovány) působí mezi atomy přitažlivá síla nepřímo úměrná sedmé mocnině vzdálenosti.

Při určité vzdálenosti atomů, v obrázku označeno písmenem  $d$ , jsou odpuzivé a přitažlivé síly vyrovnané, další zmenšování vzdálenosti mezi atomy vede silnému odpuzování atomů.

Naopak je-li síla, která atomy vzdaluje dostatečně silná, atomy se oddělí a vazba se zruší.



## Elektrické síly

Síly působící mezi elektricky nabitými částicemi.

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{|\vec{r}|^2} \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|}$$

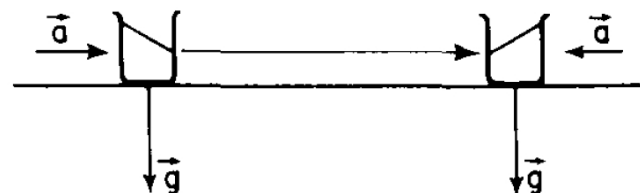
## Jaderné síly

Síly působící v jádrech atomů, jsou to síly krátkého dosahu ( $r_0 = 10^{-15}\text{m}$ ), platí pro ně zákony kvantové mechaniky, ne newtonovské zákony.

$$F = \frac{1}{r^2} \exp\left(-\frac{r}{r_0}\right)$$

## Setrvačné síly

Někdy jsou označovány jako **neskutečné, nepravé** nebo **fiktivní síly**. Jsou důsledkem toho, že pozorovatel se nenachází v inerciální soustavě, jež je nejjednodušší souřadnicovou soustavou, nýbrž v soustavě, která koná zrychlený pohyb.



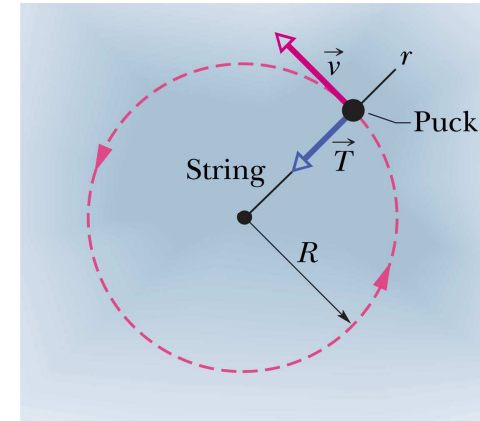
Jednoduchou ilustrací je experiment s pohárem naplněným vodou, který posouváme po stole. Na vodu působí tíha směrem dolů, ale v důsledku horizontálního zrychlení na ni působí i nepravá síla ve směru opačném ke zrychlení. Výslednice sil gravitační a nepravé síly svírá s vertikálou určitý úhel, povrch vody bude po dobu zrychlování k této výslednici kolmý a hladina vody bude s rovinou stolu svírat určitý úhel. Když přestaneme posunovat pohár a ten se v důsledku tření začne zpomalovat nepravá síla změní svůj směr a hladina vody bude sahat výše na předním okraji poháru.

Dalším příkladem setrvačných sil jsou odstředivá a Coriolisova síla, které se objevují v rotujících souřadných soustavách.

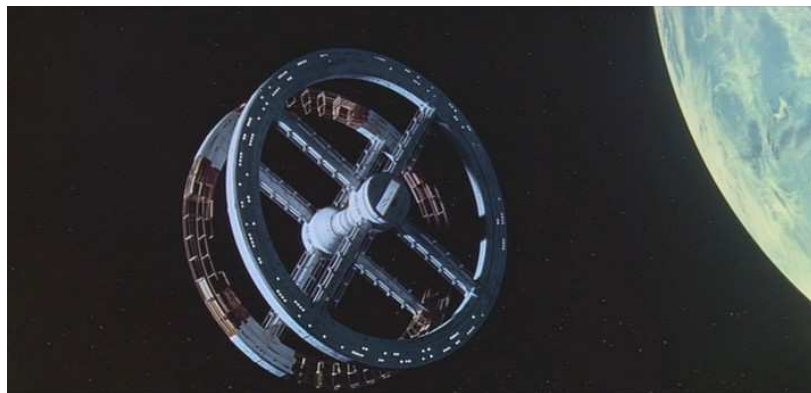
Zajímavé je, že **setrvačné síly jsou úměrné hmotnosti**, podobně jako síla gravitační!! Co s tím, je gravitace také setrvačnou silou; Einstein → Obecná teorie relativity?

## Rovnoměrný kruhový pohyb – dostředivá síla

**Dostředivá síla** působí na tělesa pohybující se po zakřivené dráze-působí ve směru ke středu. **Reakcí dostředivé síly** je **síla odstředivá** působí ve směru vazby ale v opačném směru. Na obrázku je dostředivá síla reprezentovaná mechanickým upevněním, strunou k níž je rotující těleso (puk) upevněno. Dostředivou silou je například třecí síla působící na automobil projíždějící zatáčkou (drží automobil na silnici), gravitační síla působící na obíhající planety atd.



$$F = m \frac{v^2}{r}$$



Stanley Kubrick a Arthur C. Clarke, 1968: Space odyssey 2001



Vesmírné město.