

Fyzika Zeme

- Úvodný kurz pre poslucháčov prvého ročníka bakalárskych programov v rámci štúdia geológie
- Mechanika, Newtonova gravitácia

Obsah prednášky:

- základné pojmy (dráha, rýchlosť, zrýchlenie, ...)
- Newtonove pohybové zákony
- Keplerove zákony
- Newtonov gravitačný zákon
- vzťažné sústavy, inerciálne a neinerciálne
- zdanlivé sily v neinerciálnych sústavách,
Coriolisova sila, precesný pohyb
- sila, impulz sily, moment sily, hybnosť

Základné pojmy - mechanika

Mechanika - skúma pohybové stavy telies
(kinematika)
a príčiny ich pohybu
(dynamika).

Základné pojmy a veličiny (v mechanike)

Hmotný bod – objekt so zanedbateľnými rozmermi a nenulovou hmotnosťou (pri pohybe vykonávajú všetky časti telesa ten istý pohyb).

Teleso je súbor atómov, molekúl alebo iónov - sústava hmotných bodov. Sily, ktoré jednotlivé častice držia pohromade nazývame vnútorné sily.

Tuhé teleso - rozmery a tvar telesa nemožno zanedbať.

Dokonale tuhé teleso je také teleso, ktoré sa pôsobením vonkajších síl nedeformuje.

Soft body



Rigid body



Základné pojmy a veličiny (v mechanike)

Pohyb je zmena polohy hmotného bodu (telesa).

Pohyb môže byť pravidelný (rovnomerný) a nepravidelný (nerovnomerný).

Poznáme:

- posuvný,
- otáčavý (rotačný) a
- kmitavý (oscilačný) pohyb.

Trajektória je dráha (tvar dráhy) pri posuvnom pohybe – geometrická čiara, ktorú opisuje pri pohybe hmotný bod alebo teleso.

Dráha (vzdialenosť) sa často označuje veličinou s [m].

Vo väčšine prípadov je dráha skalárna veličina, ale niekedy je to vektor.

Základné pojmy a veličiny (v mechanike)

Rovnomerný priamočiary pohyb hmotného bodu:

- **dráha**, s [m] (vzdialenosť)

(pod pojmom trajektória sa chápe skôr tvar dráhy)

- **rýchlosť**, \mathbf{v} [m/s, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] (zmena dráhy za jednotku času)

$v = s/t$ (priemerná rýchlosť), $v(\Delta t) = \Delta s/\Delta t$ (po úsekoch),

poznáme aj uhlovú rýchlosť ω [$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$] (rotujúce objekty)

- **zrýchlenie**, \mathbf{a} [m/s^2 , $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$] (zmena rýchlosti za jednotku času)

$a = v/t$ (priemerné zrýchlenie), $a(\Delta t) = \Delta v/\Delta t$ (po úsekoch),

(veľmi dôležité je gravitačné zrýchlenie \mathbf{g})

- **ryv**: \mathbf{r} [m/s^3 , $\text{m}\cdot\text{s}^{-3}$] (zmena zrýchlenia za jednotku času)

Základné pojmy a veličiny (v mechanike)

Zrýchlený pohyb hmotného bodu:

Zo základného vzťahu pre zrýchlenie $a = v/t$ vyplýva:

$$v = v_0 + at$$

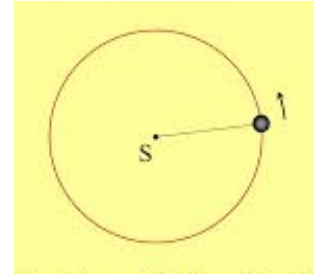
kde v_0 je tzv. začiatočná (počiatočná) rýchlosť.

Pre dráhu zrýchleného pohybu platí:

$$s = v_0 t + \frac{1}{2} at^2$$

Základné pojmy a veličiny (v mechanike)

Rovnomerný pohyb hmotného bodu po kružnici:



Je to pohyb, pri ktorom sa hmotný bod pohybuje po trajektórii tvaru kružnice, pričom veľkosť jeho obvodovej rýchlosti je konštantná (smer rýchlosti sa mení). Rovnomerný pohyb po kružnici je periodický pohyb s periódou T (je to čas, za ktorý hmotný bod opíše celú kružnicu, $[T] = s$).

Obrátená hodnota periódy sa nazýva frekvencia f a určuje počet obbehov, ktoré hmotný bod vykoná za jednu sekundu.

$$f = \frac{1}{T}, [f] = s^{-1} = \text{Hz}$$

Uhlová rýchlosť ω je veľkosť uhla, ktorý opíše sprievodič r hmotného bodu za jednu sekundu. $[\omega] = \text{rad s}^{-1}$

Ak poznáme periódu alebo frekvenciu pohybu, uhlovú rýchlosť vyjadríme ako:

$$\omega = 2\pi/T = 2\pi f$$

Pre obvodovú rýchlosť potom platí:

$$v = \omega r = 2\pi r f = 2\pi r / T$$

Pre zrýchlenie (tzv. dostredivé) v dôsledku rotácie platí: $a_n = \omega^2 r$.

Newtonove zákony pohybu:

1. zákon (zákon zotrvačnosti):

Teleso zotrváva v pokoji alebo rovnomernom priamočiarom pohybe, ak nie je donútené vonkajšou silou tento stav zmeniť. Platí aj obrátene: Ak je teleso v pokoji alebo sa pohybuje rovnomerne priamočiaro, nepôsobí naň žiadna sila alebo výslednica pôsobiacich síl je nulová.

2. zákon (zákon sily):

Sila pôsobiaca na teleso mu udeľuje zrýchlenie, ktorého veľkosť je daná podielom veľkosti sily a hmotnosti telesa. Vyplýva z neho tzv. Newtonova pohybová rovnica: $\vec{F} = m \vec{a}$
Smer zrýchlenia je totožný so smerom pôsobiacej sily.

3. zákon (zákon akcie a reakcie):

Telesá na seba pôsobia vždy vzájomne, dvojicami síl rovnakej veľkosti a opačného smeru (ktoré súčasne vznikajú a zanikajú).

1. zákon (zákon zotrvačnosti):

With no outside forces,
this object will
never move



With no outside forces,
this object will
never stop



2. zákon (zákon sily):

$$\vec{F} = m \vec{a}$$

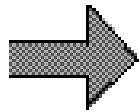
Jednotky:

$[m] = \text{kg}$

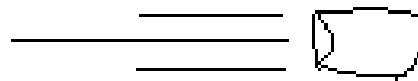
$[a] = \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ (zrýchlenie = zmena rýchlosti za jednotku času)

$[F] = \text{N} = \text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$

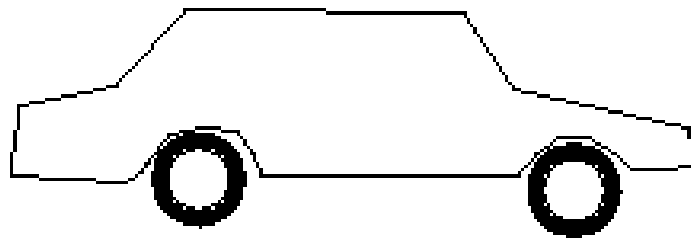
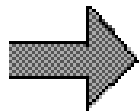
Same force



small mass: large acceleration



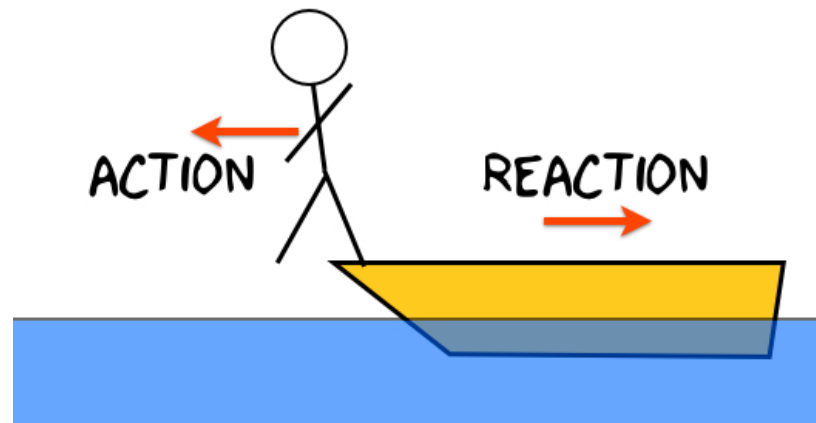
large mass: small acceleration



Force = mass x acceleration

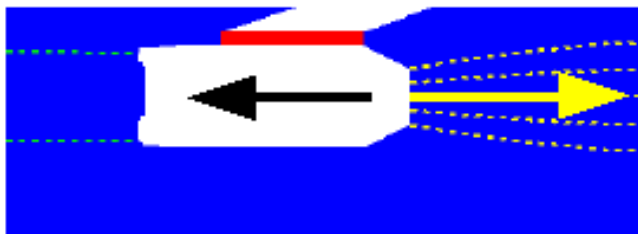
3. zákon (zákon akcie a reakce):

Príklad: pohyb účastníka plavby s loďkou



Príklad: prúdový motor

Engine pushed forward.



Flow pushed backward.

Jet Engine

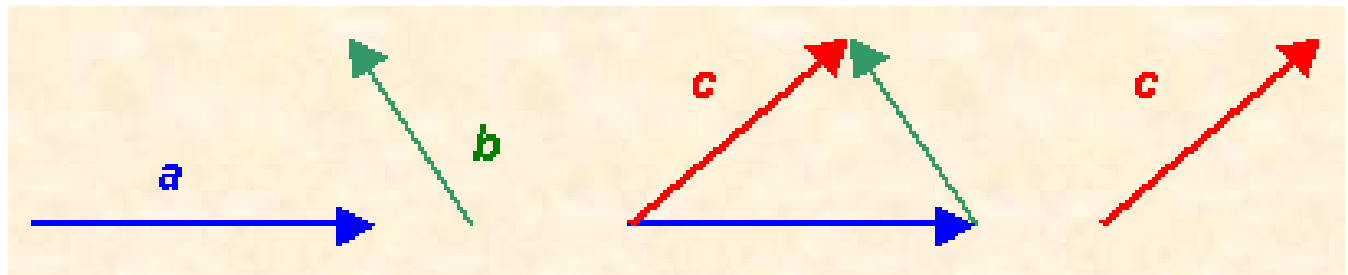


Základné pojmy - mechanika

Sila \vec{F} , jednotka [N], $\left[\text{N} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2} \right]$

Definícia jednotky: jeden Newton je množstvo sily, ktoré udeľuje telesu s hmotnosťou 1 kilogram zrýchlenie $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ (zrýchlenie pôsobí v smere sily)

Keďže sila (aj zrýchlenie) sú vektory, pre ich skladanie a rozklad platia tie isté geometrické poučky pre súčet, prípadne rozdiel vektorov. Často je ale v kinematike nutné najprv aplikovať rovnobežný prenos vektora (napr. pri odstredivom zrýchlení).



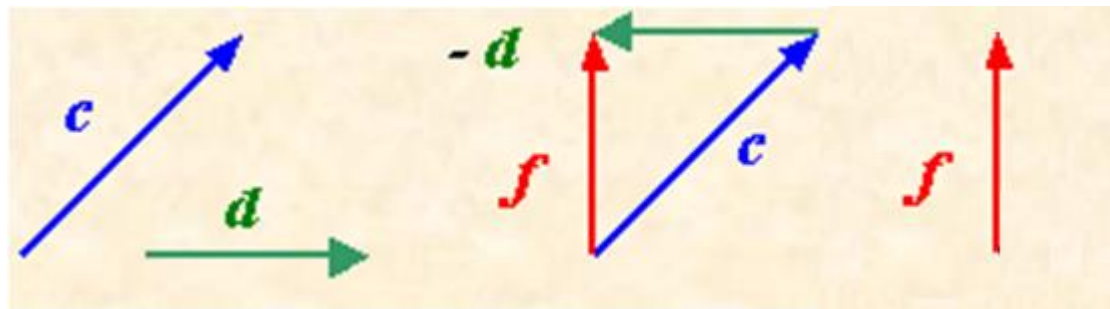
súčet vektorov

Základné pojmy - mechanika

Sila \vec{F} , jednotka [N], $\left[\text{N} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2} \right]$

Definícia jednotky: jeden Newton je množstvo sily, ktoré udeľuje telesu s hmotnosťou 1 kilogram zrýchlenie 1 m s^{-2} (zrýchlenie pôsobí v smere sily)

Keďže sila (aj zrýchlenie) sú vektory, pre ich skladanie a rozklad platia tie isté geometrické poučky pre súčet, prípadne rozdiel vektorov. Často je ale v kinematike nutné najprv aplikovať rovnobežný prenos vektora (napr. pri odstredivom zrýchlení).



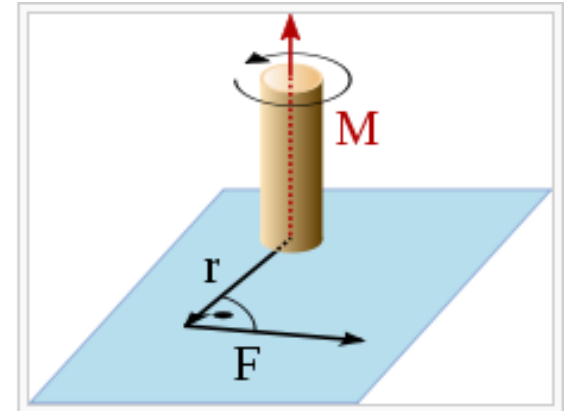
rozdiel vektorov

Základné pojmy - mechanika

Moment sily \vec{M} , jednotka $[\text{N} \cdot \text{m}]$

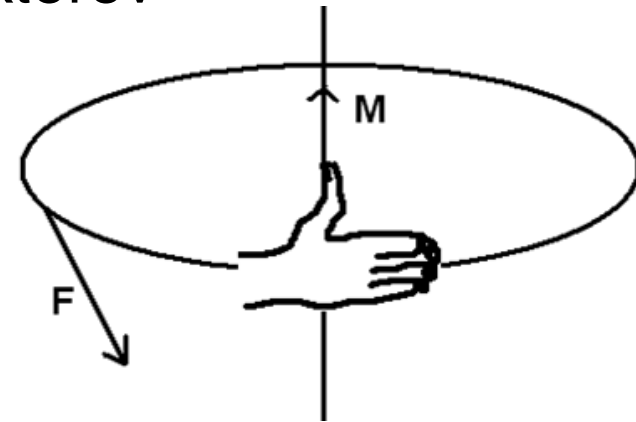
$$\vec{M} = \vec{F} \times \vec{r}$$

vektorová fyzikálna veličina,
ktorá vyjadruje mieru otáčavého účinku sily.
(\mathbf{F} – sila, \mathbf{r} – polomer)



Počíta sa ako vektorový súčin – dvoch vektorov
(sily a ramena sily).

Vektorový súčin je daný súčinom
veľkostí dvoch vektorov a sínusu
uhla, ktorý zvierajú; jeho výsledkom
je vektor, kolmý na oba pôvodné
vektory.



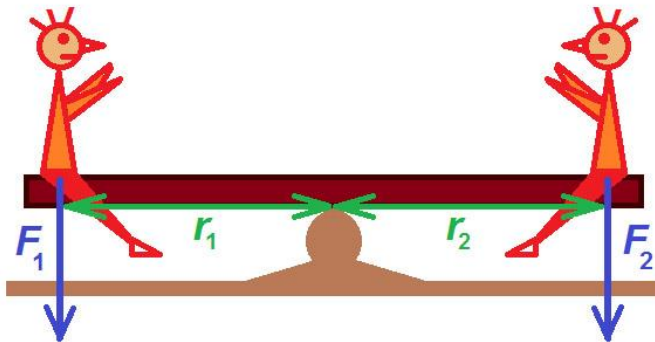
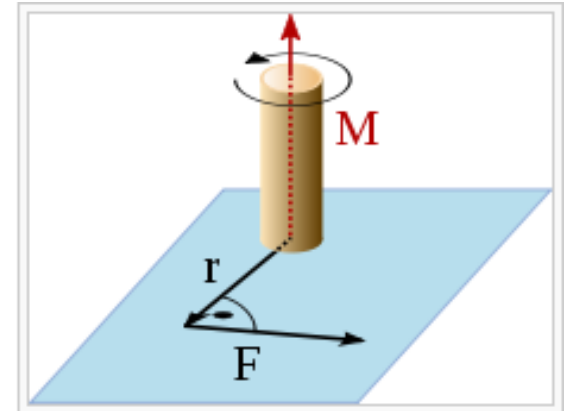
tzv. pravidlo
pravej ruky

Základné pojmy - mechanika

Moment sily \vec{M} , jednotka $[\text{N} \cdot \text{m}]$

$$\vec{M} = \vec{F} \times \vec{r}$$

je vektorová fyzikálna veličina,
ktorá vyjadruje mieru otáčavého účinku sily.
Rovnováha momentov síl sa často využíva (napr. váhy).



Základné pojmy - mechanika

Hybnosť \vec{p} , jednotka $\left[\frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}} \right]$

Definícia veličiny: súčin rýchlosti a hmotnosti telesa (charakterizuje pohybový účinok hmotnosti - okamžitý pohybový stav telesa):

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

Vektorová veličina, jej smer je totožný so smerom vektoru rýchlosti.

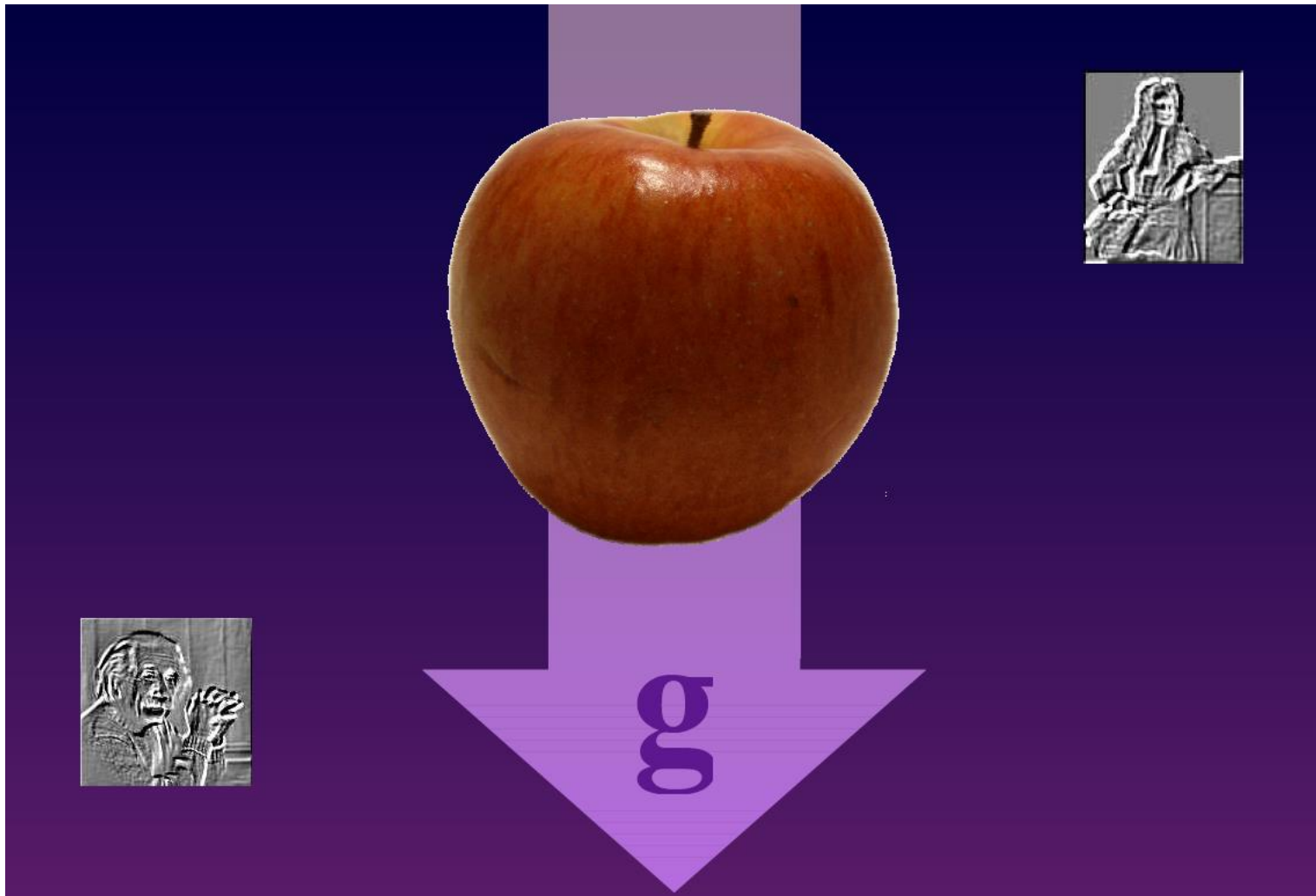
Základné pojmy - mechanika

- **tlak:** Tlak vyjadruje veľkosť sily, pôsobiacej na jednotkovú plochu.

$$p = \frac{|\vec{F}|}{a} = \frac{F}{a}$$

- kde F je veľkosť sily [N] a a je plocha [m²].
- jednotka je pascal [Pa] = [N/m²] = [kg·s⁻²·m⁻¹].
- stará jednotka bola bar (1 bar = 100000 Pa).
- je to skalárna veličina.

gravitácia



prvé serozne úvahy a pokusy snažiace sa pochopiť gravitáciu – Galileo Galilei:



**Galileo Galilei
(1564 - 1642)**

- voľný pád (podmienovaný tiažovým poľom Zeme) je zrýchlený pohyb
 - tiažové zrýchlenie g nezávisí od hmotnosti telesa (na rozdiel od predstáv Aristotela)
- pozorovania, logické úvahy + pokusy

pekný pokus (prof. Brian Cox):

<https://www.youtube.com/watch?v=E43-CfukEgs&feature=youtu.be>

d'alší pekný pokus v rámci misie Apollo na povrchu Mesiaca (N. Armstrong):

https://www.youtube.com/watch?v=5C5_dOEyAfk

IN VYSVETLUJE GALILEIHO 57

idelí nijakú rýchlosť, len
stane pri ňom bez
ento jav si vysvetľuje
vačnosti, podľa ktorého
vonkajšie sily, si
chlosť (tu
meň bez toho,

pu relativity je
naké ako hľadisko
l vysvetľuje, čo
pri A), tvrdiac, že
ní k zemi
ie, prečo kameň
o naopak), si
iho zákon, podľa
hľadu na
n



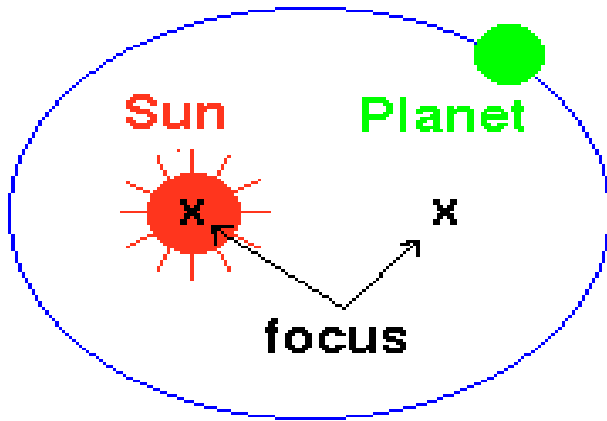
ty sú

sti som mal

jej relativity a jej
sebe Einstein
muláciu
šak bolo treba
to povedať, že
chápali jej
podobne



Keplerove zákony pohybu planét:



Kepler bol prvý, ktorý opustil filozofický predpoklad kružníc ako dokonalých dráh nebeských telies, považovaný vtedy za samozrejmosť. Toto „zväzovalo ruky“ Kopernikovi.

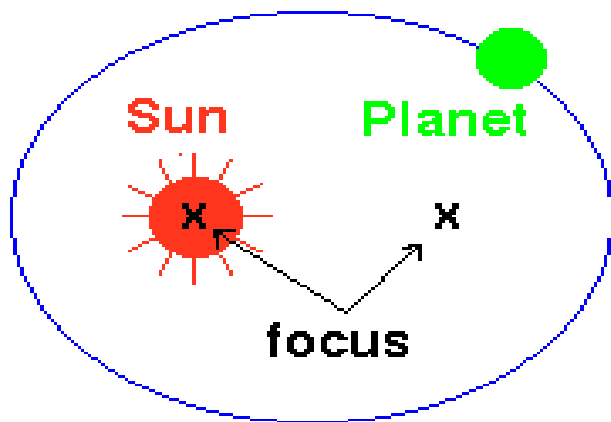


Johannes Kepler
(1571 - 1630)

Formuloval 3 zákony (nazvané po ňom):

1.zákon: Planéty sa pohybujú okolo Slnka po elipsách, v ktorých ohnisku je Slnko.

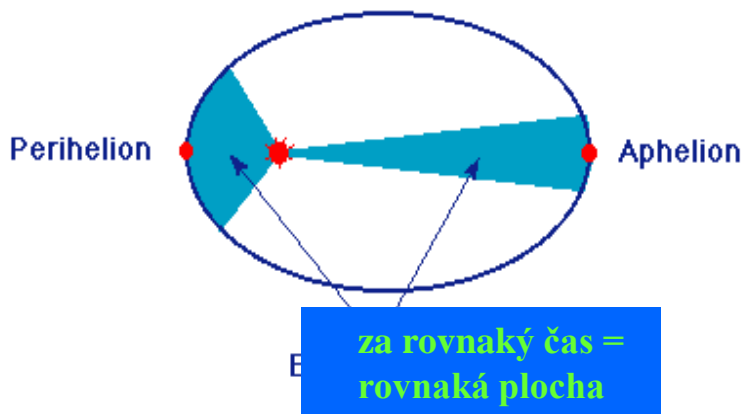
Keplerove zákony pohybu planét:



Kepler bol prvý, ktorý opustil filozofický predpoklad kružníc ako dokonalých dráh nebeských telies, považovaný vtedy za samozrejmú. Toto „zväzovalo ruky“ Kopernikovi.



Johannes Kepler
(1571 - 1630)



2.zákon

(zákon stálej plošnej rýchlosti):
Sprievodič planéty (úsečka spájajúca ju so Slnkom) opíše za rovnaký čas rovnakú plochu.
(čím ďalej je teleso od Slnka, tým pomalšie sa pohybuje)

3.zákon: Druhé mocniny obežných dôb ($T_{1,2}$) sú v rovnakom pomere ako tretie mocniny veľkých polosí dráh ($R_{1,2}$) – pre každú dvojicu telies obiehajúcich okolo toho istého centrálného telesa.

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{R_1^3}{R_2^3}$$

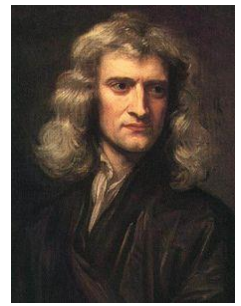
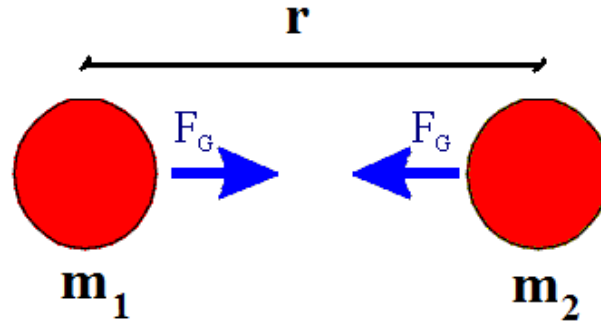
Príklad: planéty **Zem** a **Jupiter**. Obežná doba Jupitera je **11,86 roku** (11,86-násobok obežnej doby Zeme), veľká polos jeho dráhy (oproti Zemi) je **5,2-krát** väčšia. Malo by teda platiť:

$$(11.86)^2/1^2 = (5.2)^3/1^3$$
$$140.66 \approx 140.61$$

Johannes Kepler formuloval tieto zákony na základe viac ako 20-ročných pozorovaní planét, ktoré vykonal **Tycho de Brahe** so svojími spolupracovníkmi *empiricky* – *bez teoretického zdôvodnenia*.

Až **Isaac Newton** dokázal, že sú dôsledkom gravitačného zákona.

Newtonov gravitačný zákon:



Isaac Newton
(1643 – 1727)

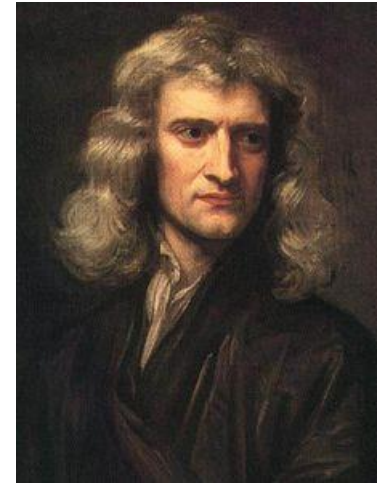
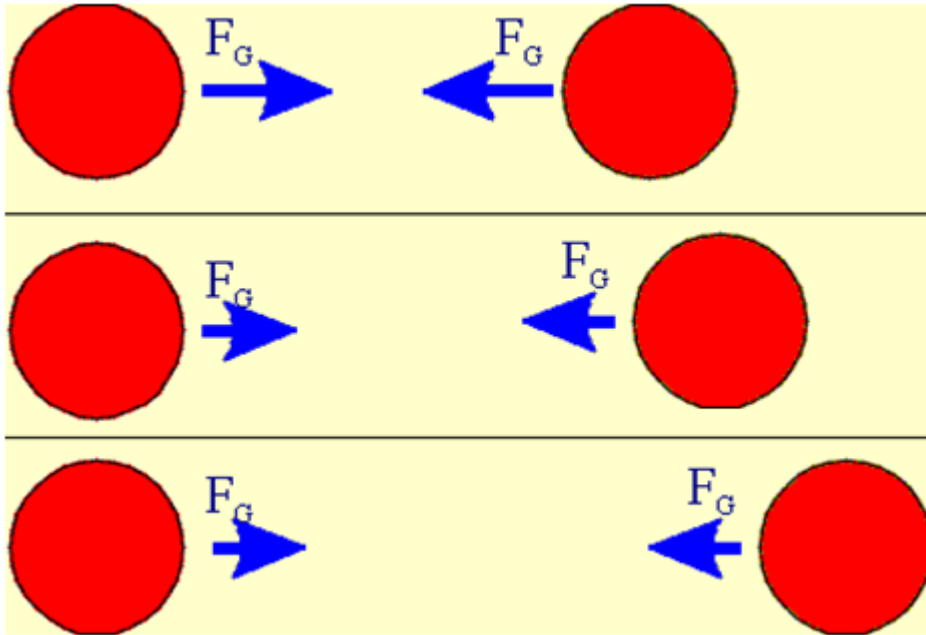
Dva hmotné body s hmotnosťami m_1 a m_2 , ktorých vzájomná vzdialenosť je r , pôsobia na seba príťažlivými silami s hodnotou priamo úmernou súčinu ich hmotností a nepriamo úmernou štvorcu (druhej mocniny) ich vzdialenosti.

$$F_G = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad [\text{N}]$$

$$G = \kappa = 6.6743 \cdot 10^{-11} \left[\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2} \right]$$

konštanta G (niekedy býva označovaná κ , *grécka kappa*) - gravitačná konštanta - určil ju prvýkrát Henry Cavendish pomocou *torzných váh* - schéma jeho experimentu bude vysvetlená neskôr.

Newtonov gravitačný zákon:



Isaac Newton
(1643 – 1727)

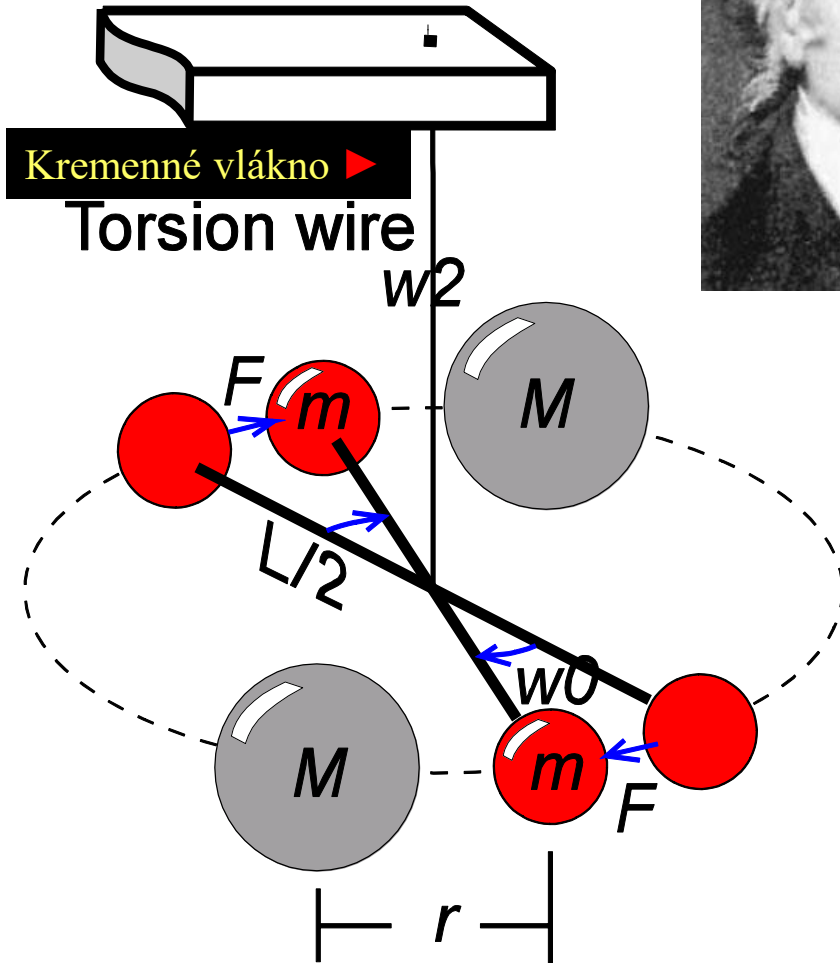
Jeho základné
dielo
*„Philosophae
Naturalis
Principia
Mathematica“*
vyšlo r.1687

Oproti silám elektrickým, ktoré môžu byť *príťažlivé* aj *odpudivé*, **gravitačné sily** sú *iba príťažlivé*.

$$F_G = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

Preto gravitácia, ktorá je v mikrosvete zanedbateľná, je vo vesmíre **rozhodujúcou silou**.

Gravitácia je sila **centrálna** – pôsobí vždy smerom spojnice ťažísk (hmotných stredov) oboch telies.



$$G = \kappa = 6.75 \cdot 10^{-11} \left[\text{N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2} \right]$$

Určenie **G** torznými váhami – prvý krát: Henry Cavendish - 1798.

Napriek pokroku meracej techniky je táto konštanta dodnes najmenej presne určenou fyzikálnou konštantou.

Presné merania sú veľmi obťažné a náročné. V astronómii a kozmonautike (výpočty dráh) sa pracuje so súčinnmi (**$G \cdot M$**), kde **M** je hmotnosť príslušného telesa (napr. Zeme). **Hodnoty týchto súčinnov sú známe s oveľa vyššou presnosťou.**

gravitačné zrýchlenie (g):

Newtonov gravitačný zákon:

$$|\mathbf{F}| = G \frac{m_1 m_2}{r^2} = G \frac{mM}{r^2}$$

z Newtonovho zákona sily vyplýva pre zrýchlenie \mathbf{g} :

$$|\mathbf{F}| = mg \Rightarrow |\mathbf{g}| = \frac{F}{m} \Rightarrow |\mathbf{g}| = G \frac{M}{r^2} [\text{m}\cdot\text{s}^{-2}]$$

Hodnota g ?

u nás cca $9.81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ (alebo zaokrúhlene $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$)

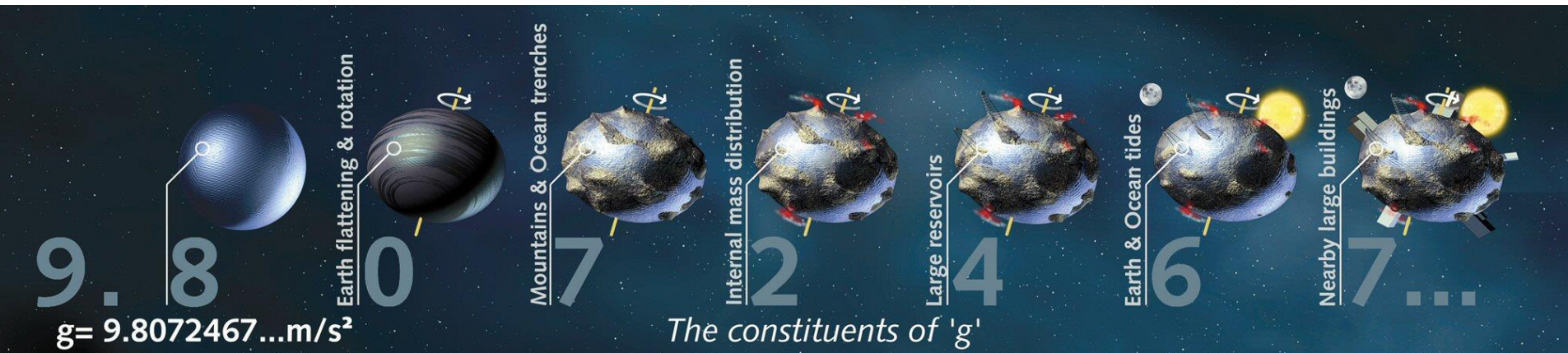
Je možné odhadnúť výpočtom – vid' nasledujúci snímok.

gravitačné zrýchlenie (g):

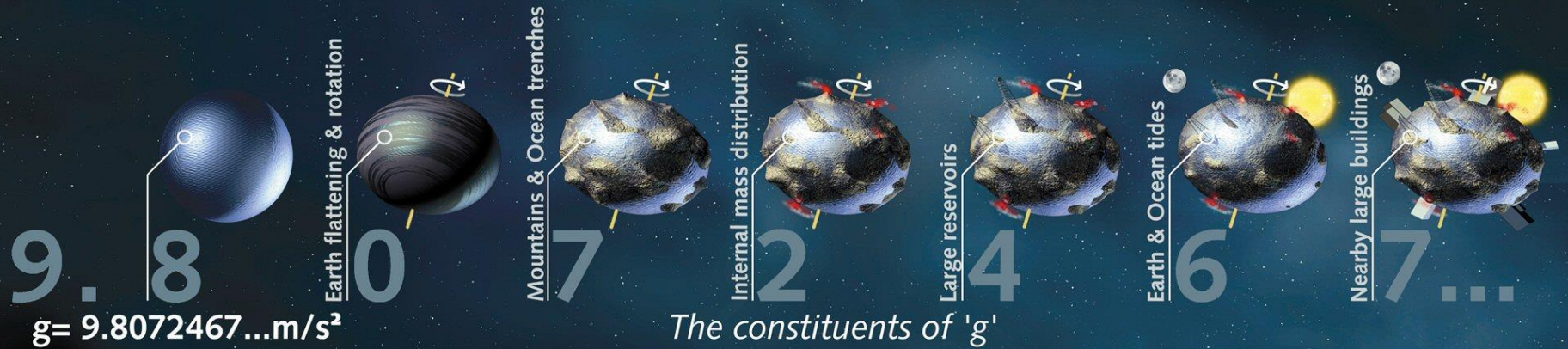
Konkrétna hodnota zrýchlenia – pre Zem:

(hmotnosť Zeme $\sim 5.9 \cdot 10^{24}$ kg; polomer Zeme ~ 6371000 m,
 $G \sim 6.7 \cdot 10^{-11}$ N·m²/kg²)

$$|\mathbf{g}| = G \frac{M}{r^2} \approx 9.8 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-2}\text{]}$$



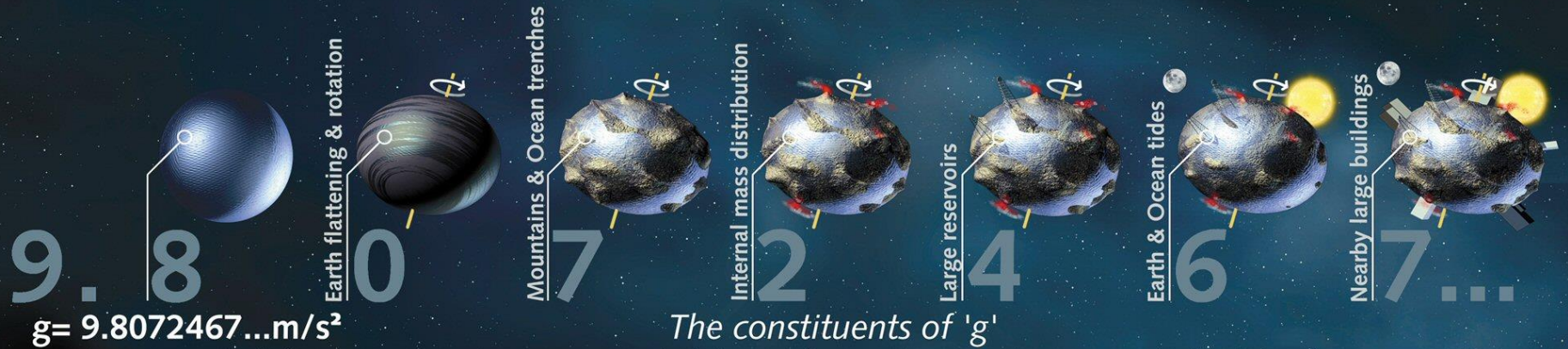
gravitačné zrýchlenie (g):



Je táto hodnota rovnaká pre všetky telesá na zemskom povrchu?
(telesá s rôznou hmotnosťou, umiestnené v tom istom bode)

Je táto hodnota rovnaká pre všetky miesta na zemskom povrchu?
(na póle, na rovníku, u nás ...)

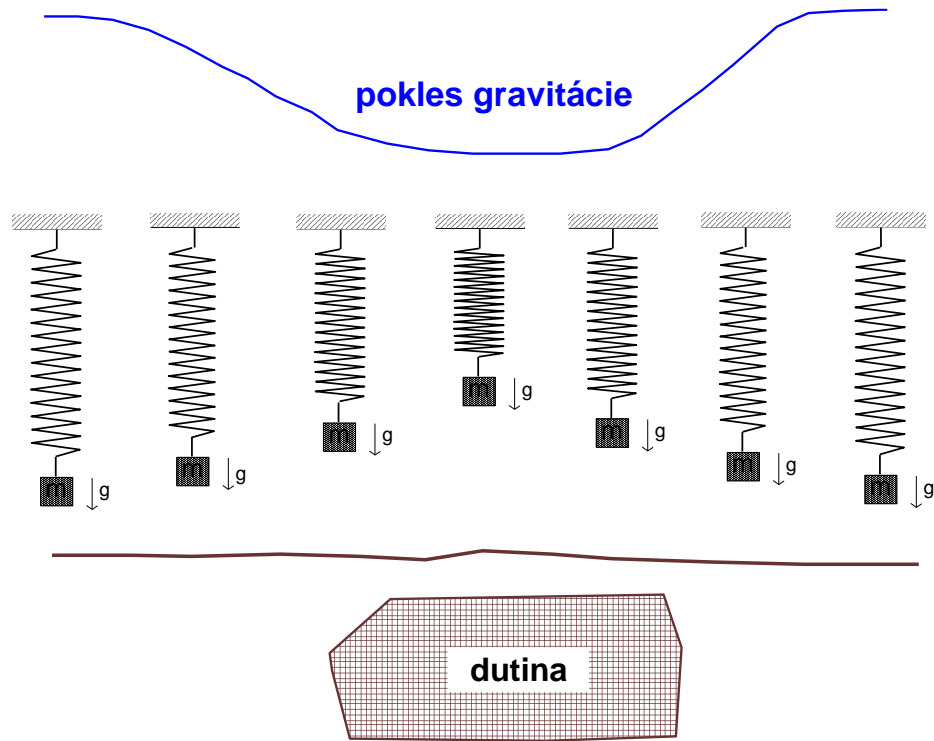
gravitačné zrýchlenie (g):



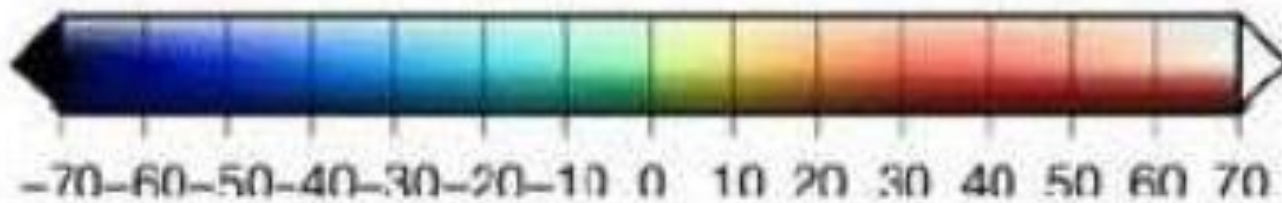
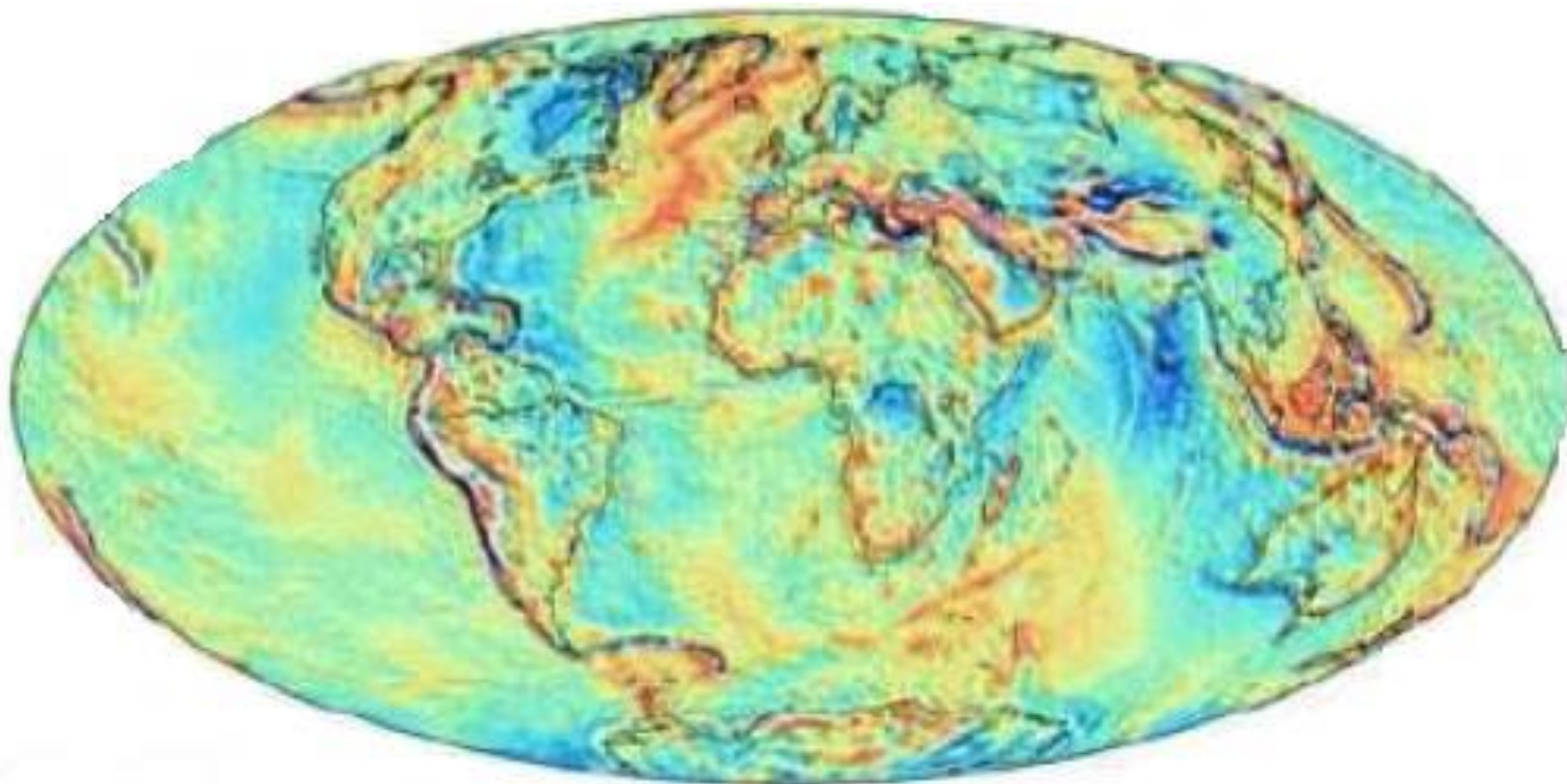
Je táto hodnota rovnaká pre všetky telesá na zemskom povrchu?
(telesá s rôznou hmotnosťou, umiestnené v tom istom bode)
približne áno (pri zanedbaní odporu vzduchu), nezávisí od hmotnosti
(vo vákuu platí, ževšetkým telesám je udeľované rovnaké g)

Je táto hodnota rovnaká pre všetky miesta na zemskom povrchu?
(na póle, na rovníku, u nás ...)

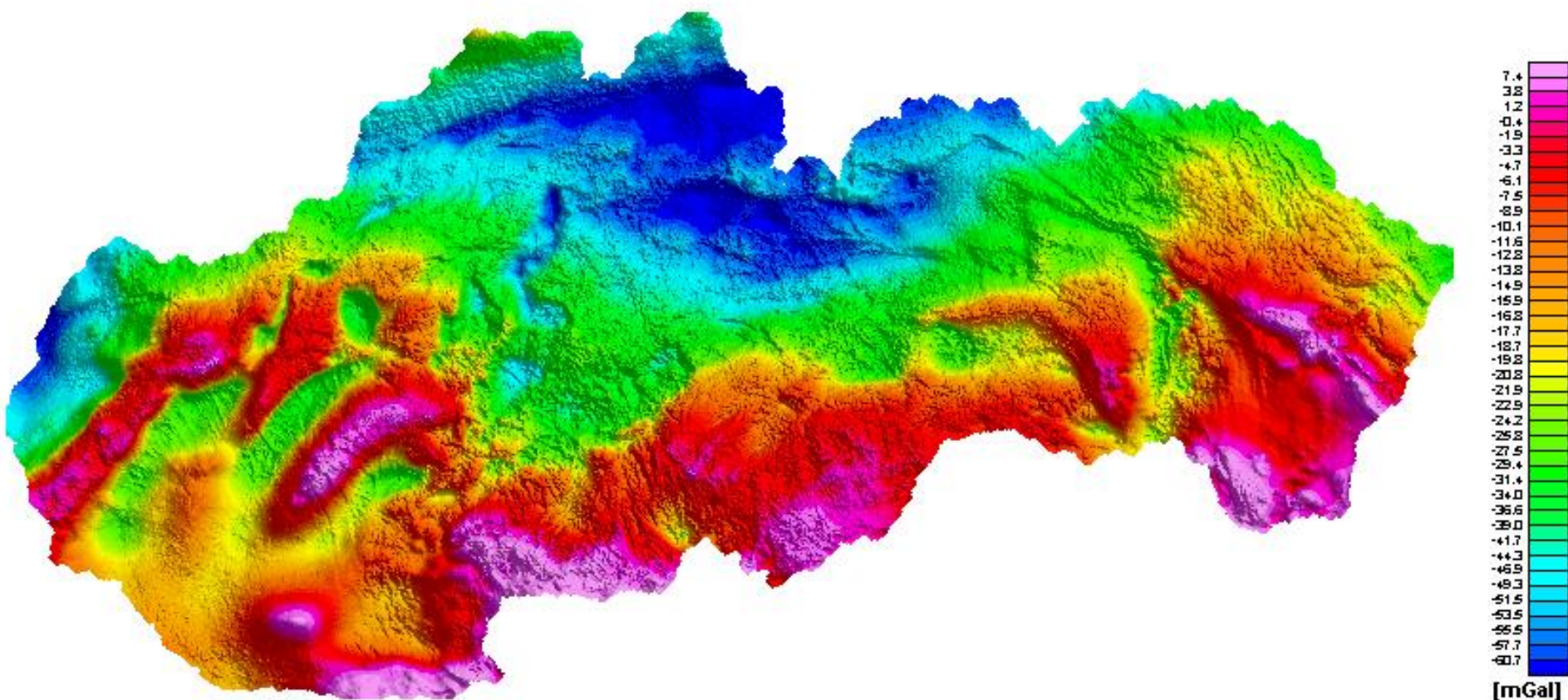
nie – nakoľko naša Zem rotuje a tým pôsobí na objekt aj odstredivé
zrýchlenie a celkové zrýchlenie závisí aj od nadmorskej výšky a topografie



prístroje na meranie tiažového zrýchlenia Zeme - gravimetre



anomálne tiažové pole na povrchu Zeme (na kontinentoch a na hladinách oceánov)



anomálne tiažové pole na území SR (tzv. Bouguerove anomálie)

Gravitácia - dôsledky

Voľný pád:

Výpočet dráhy s:

$$s = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$$

Keď vezmeme pre čas $t = 0$ začiatočnú hodnotu $v_0 = 0$, tak získame známy vzorec:

$$s = \frac{1}{2} g t^2$$

Pre rýchlosť v platí: $v = v_0 + g t$



Príklad:

$$t_1 = 1 \text{ sek.} \Rightarrow s_1 = 0.5 g t_1^2 = 5 \cdot 1 = 5 \text{ m}$$

$$t_2 = 2 \text{ sek.} \Rightarrow s_2 = 0.5 g t_2^2 = 5 \cdot 4 = 20 \text{ m}$$

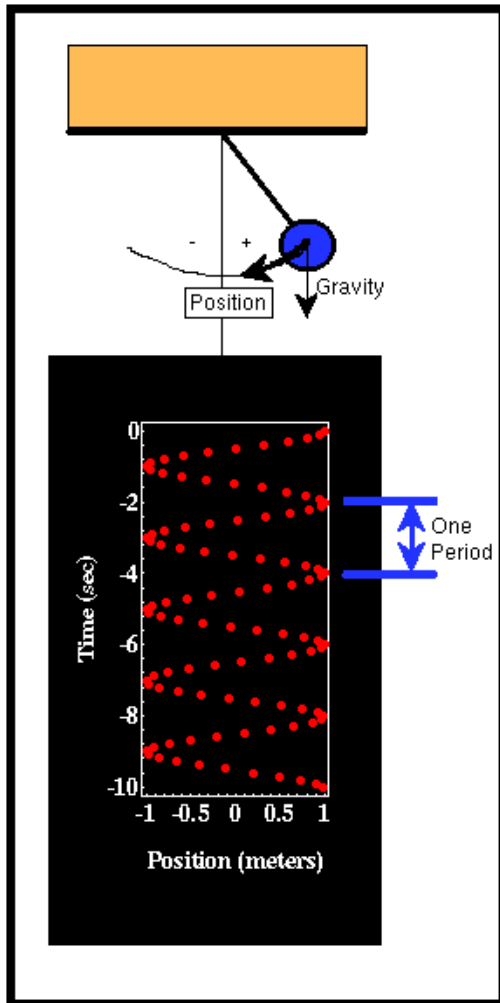
$$t_3 = 3 \text{ sek.} \Rightarrow s_3 = 0.5 g t_3^2 = 5 \cdot 9 = 45 \text{ m}$$

$$t_4 = 4 \text{ sek.} \Rightarrow s_4 = 0.5 g t_4^2 = 5 \cdot 16 = 80 \text{ m}$$



Gravitácia - dôsledky

matematické kyvadlo



Napríklad aj doba kyvu matematického kyvadla s dĺžkou L nezávisí od hmotnosti objektu m na jeho konci:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}} \quad [\text{s}]$$

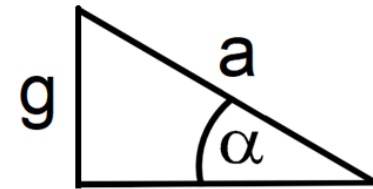
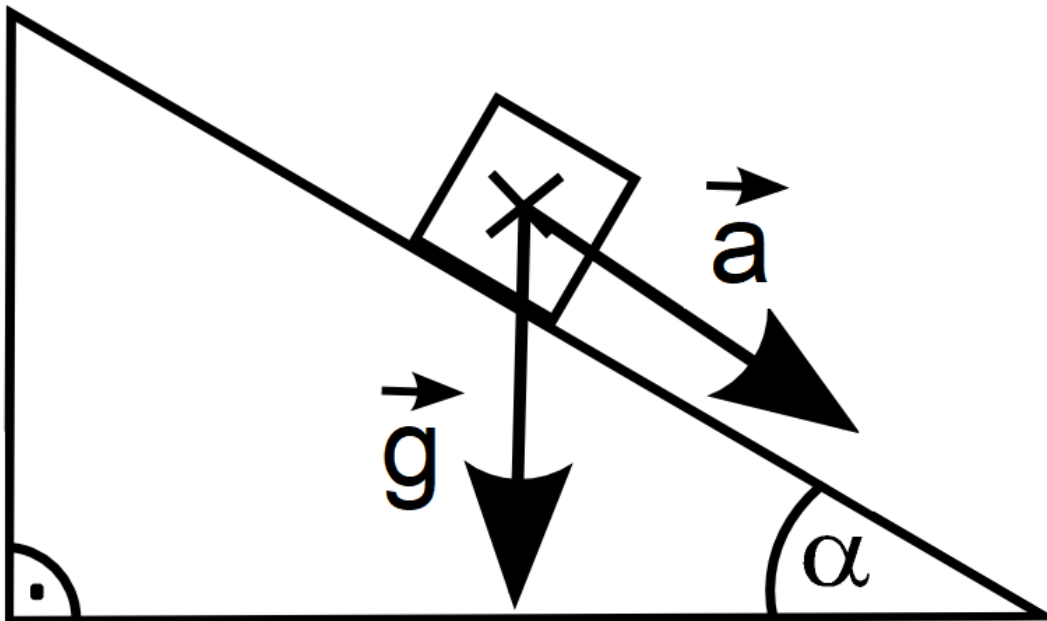
Walter Lewin – prednáška MIT (video),

$L = 5.21 \text{ m}$, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$,
odhad doby kyvu: 4.58 s

http://www.youtube.com/watch?v=KXys_mymMKA

Gravitácia - dôsledky

kĺzavý pohyb po naklonenej rovine (bez trenia)



$$\mathbf{a = g \sin \alpha}$$

Pozn.: Pohyb vody v hydrológii – zodpovedá tomuto modelu. Inak je to ale pri tzv. valivom pohybe, kde sa uplatňuje pri rotácii telesa tzv. moment zotrvačnosti (a ten už je funkciou hmotnosti).

skalné more – Vyhne – tzv. gravitačné triedenie (?)

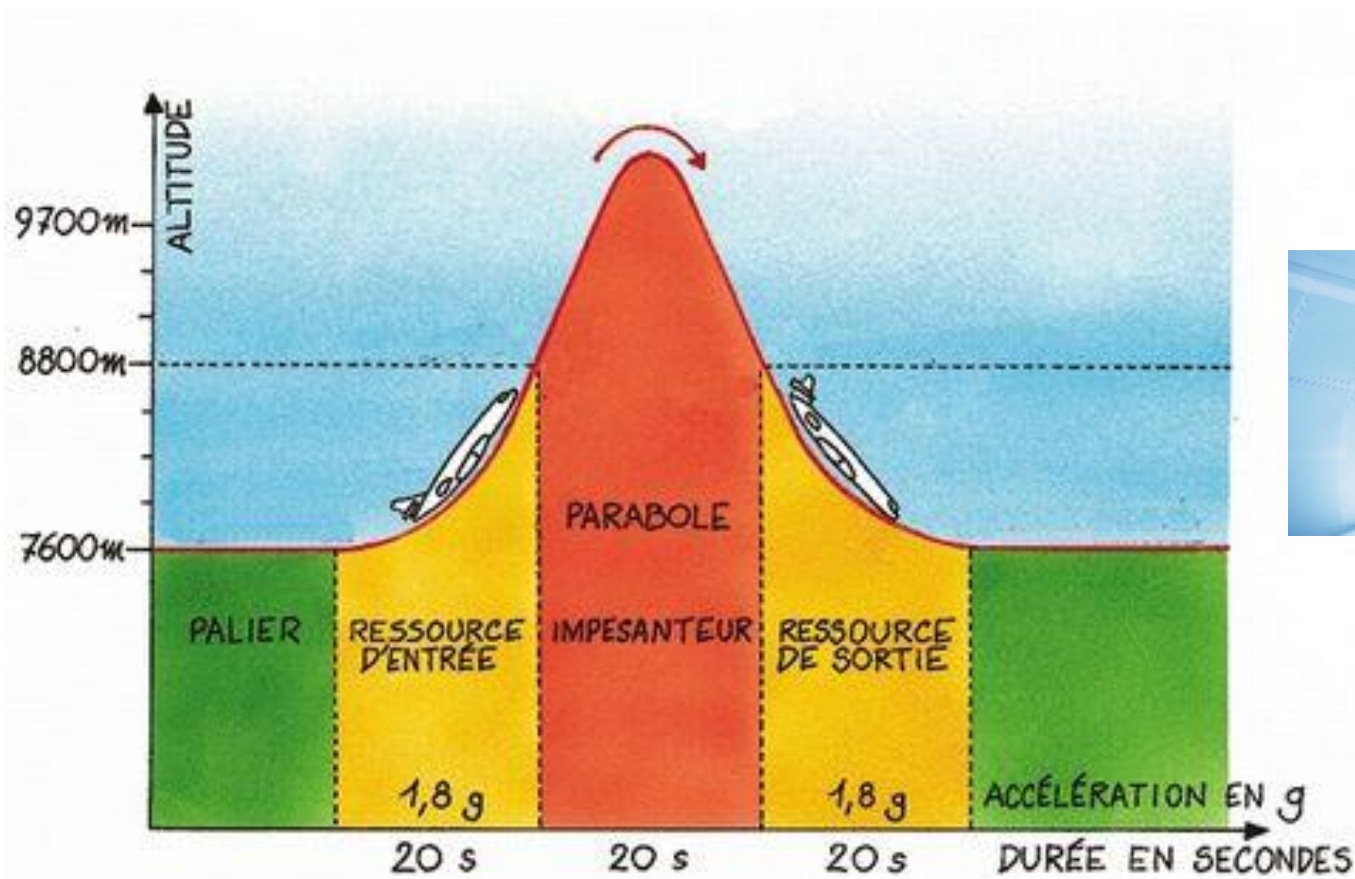


skalné more – Vyhne – tzv. gravitačné triedenie (?)



tzv. parabola nulového G (zero G parable)

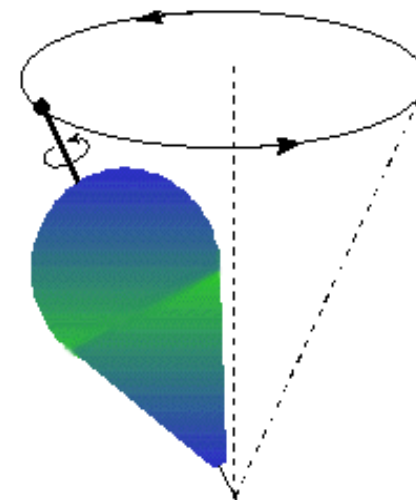
simulovanie beztiažového stavu na Zemi (v lietadle)



je možné dosiahnuť aj stav tiažového poľa na Mesiaci alebo Marse (využívané aj na komerčné účely: <http://www.gozerog.com>)

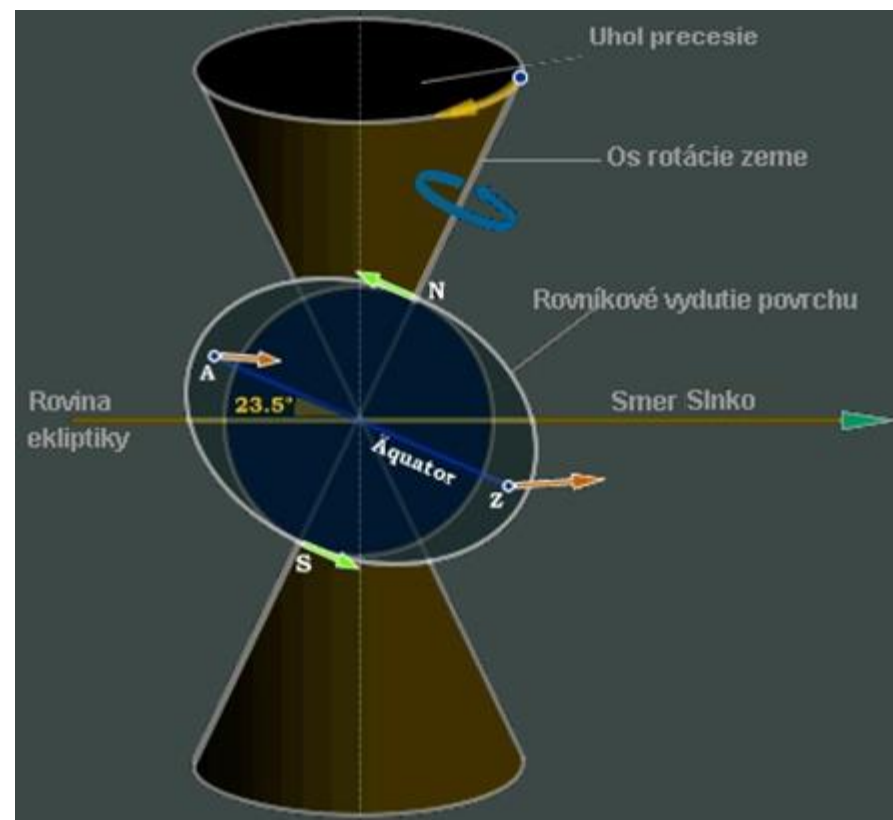
Precesný pohyb:

Ak je rotačná os rotujúceho telesa odchýlená od vertikály – potom moment dvojice síl (gravitačnej a reakcie podložky) vyvoláva tzv. precesný pohyb jeho osi.



Zem je vlastne obrovský zotrvačník. Účinkom gravitácie Mesiaca a Slnka („bočné“ sily) jej os vykonáva precesný pohyb po povrchu symbolického kužeľa, ktorého os je kolmá na ekliptiku (rovinu obehu Zeme okolo Slnka) a vrcholový uhol je približne 47° ($2 \times 23,5^\circ$).

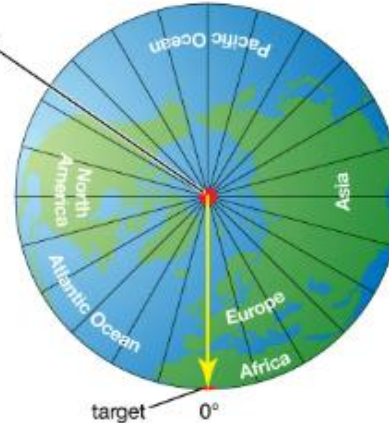
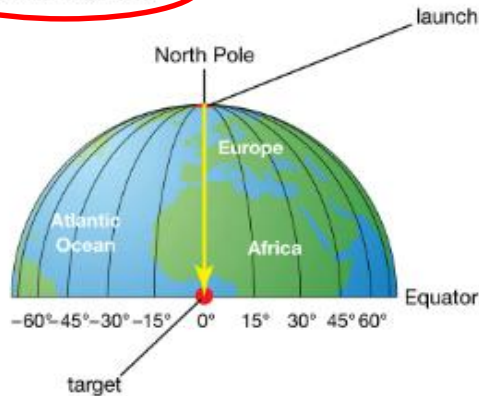
Jeden precesný obeh zemskej osi okolo pólu ekliptiky má dĺžku 25 700 rokov.



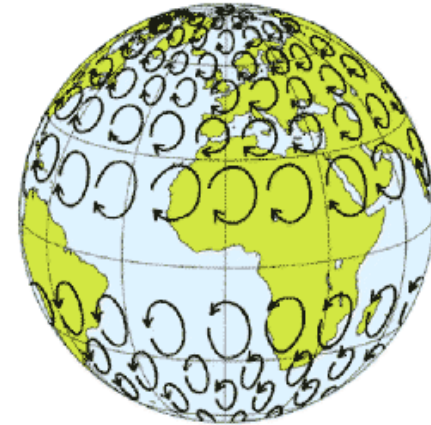
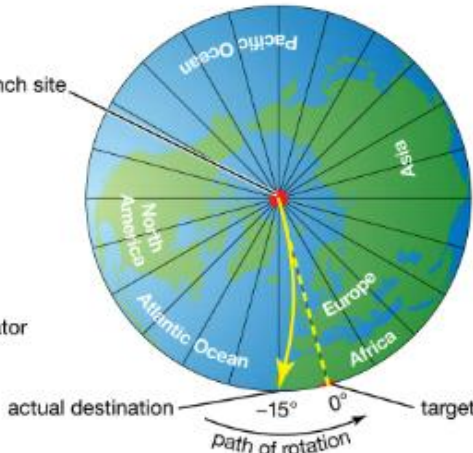
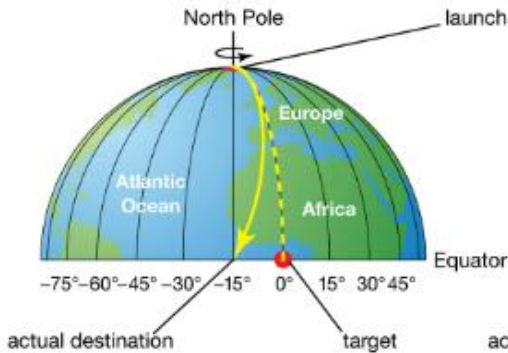
Coriolisova sila - vzniká dôsledkom rotácie našej Zeme (pôsobí na pohybujúce sa objekty v smere J-S)

The effect of the Coriolis force

Nonrotating Earth



Earth rotating 15° each hour



Coriolisova sila - vzniká dôsledkom rotácie našej Zeme.

Ak sme na severnej pologuli a teleso sa pohybuje na juh, „prichádza“ do miest, ktorých obvodová rotačná rýchlosť je väčšia akú malo teleso v počiatočnom bode – dochádza ku „deformácii“ jeho dráhy pohybu - pri pohľade v smere pohybu sa odchyľuje vpravo (k západu). Pri pohybe telesa smerom na sever je to opačne.

Ak budeme na južnej polguli, všetko prebieha symetricky obrátene.

Táto sila má veľký význam v meteorológii a v náuke o prúdení vôd v riekach a oceánoch.



Coriolisova sila - vzniká dôsledkom rotácie našej Zeme.

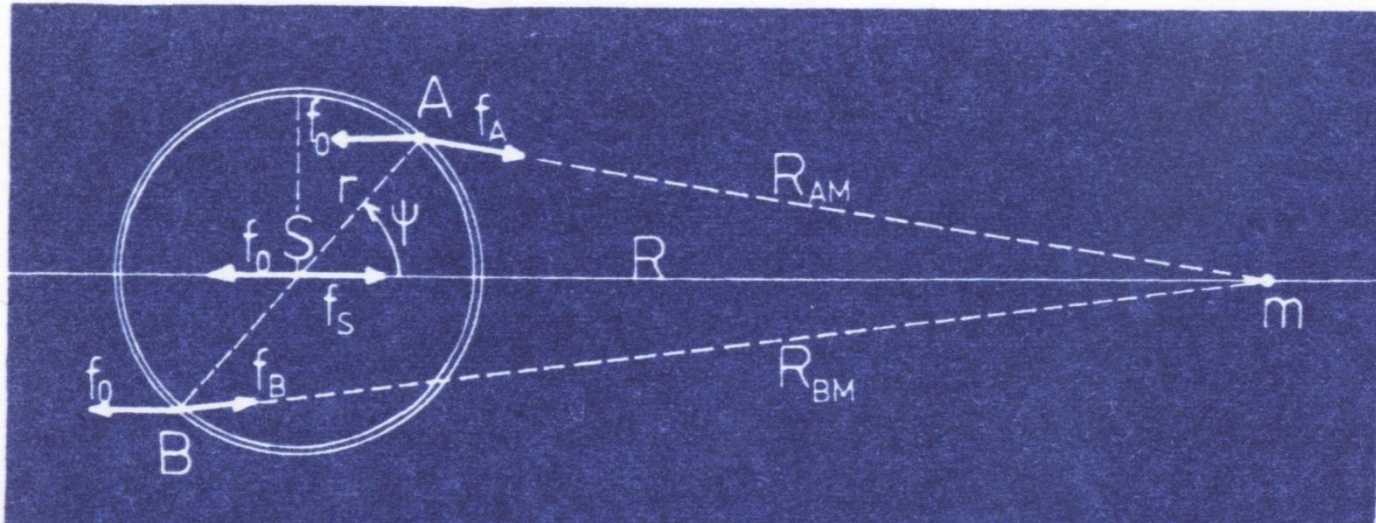
V bežnom živote Coriolisovu silu nepozorujeme – často tradované tvrdenie, že podľa smeru víru napr. pri vypúšťaní vody z vane poznáme, či sme na severnej alebo južnej polguli, je nezmysel. Bolo by to možné iba pri ideálne horizontálnom dne nádoby a absolútnom klúde hladiny.

Veľké rieky tečúce zo severu na juh majú zvyčajne pravé (západné) brehy strmšie ako ľavé (východné). Je to dôsledok dlhodobého pôsobenia Coriolisovej sily.



Slapy (prílív a odliv)

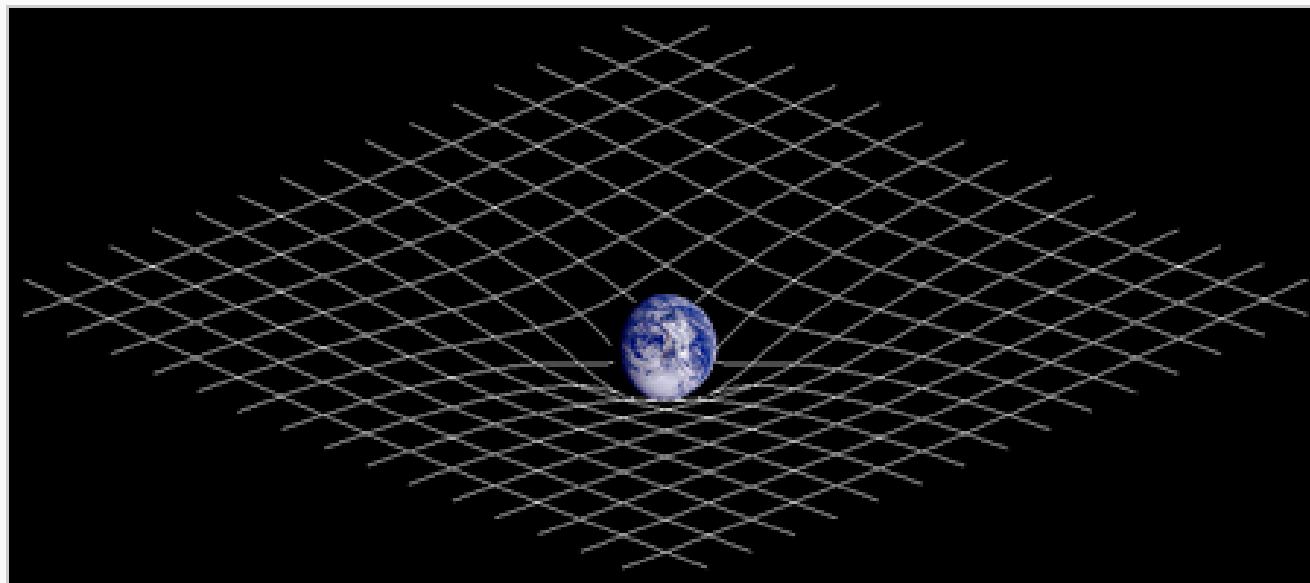
Vznikajú v dôsledku účinku Mesiaca a Slnka – v system, kedy uvažujeme rotáciu jedného telesa okolo druhého.



Z gravitačných zrýchlení je najväčšie \mathbf{f}_A (bod A je najbližšie ku m) a najmenšie je \mathbf{f}_B (bod B je najďalej od m). V každom z bodov A, S, B pôsobí aj odstredivé zrýchlenie \mathbf{f}_0 v dôsledku toho, že obe telesá sa podieľajú na rotácii jeden okolo druhého (mesiac okolo Zeme a Zem okolo Slnka). Výslednica vektorov $\mathbf{f}_B + \mathbf{f}_0$ v bode B je cca rovnaká, ale s opačným znamienkom ako výslednica $\mathbf{f}_A + \mathbf{f}_0$ v bode A – preto pôsobia slapy podobne na odvrátených poloviciach Zeme.

Toto vysvetlenie pochádza už od I. Newtona.

úplne iný pohľad dáva na gravitáciu Einsteinova všeobecná teória relativity – nejde o silové interakcie, ale o vplyv zakriveného časopriestoru



Dvojrozmerné zobrazenie zakrivenia časopriestoru. Prítomnosť hmoty mení geometriu časopriestoru a táto (zakrivená) geometria je interpretovaná ako gravitácia.

celkom zaujímavé video:

<https://www.youtube.com/watch?v=MTY1Kje0yLg&t=408s>

cez všeobecnú teóriu relativity sa dajú vysvetliť čierne diery, tzv. gravitačné šošovky, atď.

