

Fyzika

- Úvodný kurz pre poslucháčov prvého ročníka bakalárskych programov v rámci štúdia geológie
- Druhá prednáška – mechanika

Obsah prednášky:

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

Základné pojmy - mechanika

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

Základné pojmy a veličiny:

- **dráha**, s [m] (vzdialenosť)

(pod pojmom trajektória sa chápe skôr tvar dráhy)

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

$v = s/t$ (priemerná rýchlosť), $v(t) = ds/dt$ (okamžitá),

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

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

(veľmi dôležité je gravitačné zrýchlenie g)

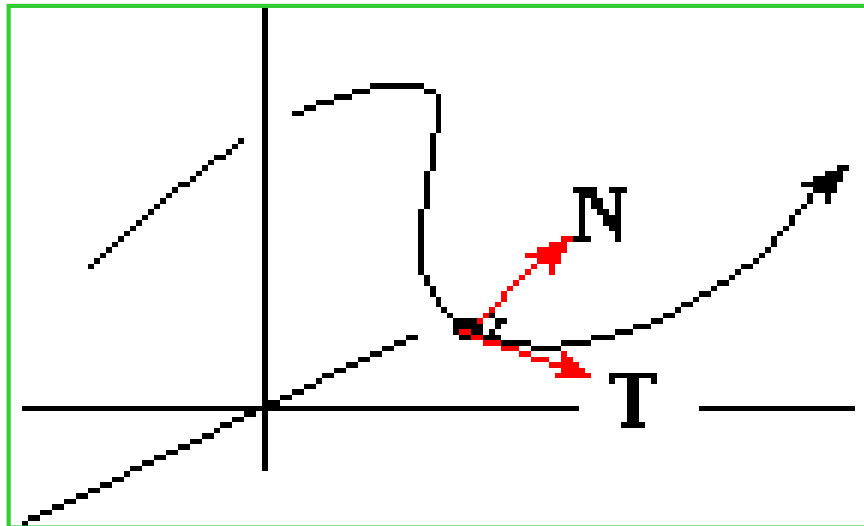
- **ryv**: r [m/s^3 , $\text{m}\cdot\text{s}^{-3}$] (zmena zrýchlenia za jednotku času)

Základné pojmy - mechanika

Základné pojmy a veličiny (pri posudzovaní dynamiky pohybu):

- rozklad vektorov na **tangenciálnu** (dotyčnicovú)
a **normálovú** (kolmú) zložku

Napr. pri pôsobení vektora rýchlosti súvisí tangenciálna zložka so zmenou jej veľkosti a normálová so zmenou jej smeru.



Základné pojmy - mechanika

Základné druhy pohybov v mechanike:

rovnomerný, nerovnomerný (zrýchlený, spomalený)
priamočiary, nepriamočiary (po kružnici, rotačný), atď. ...

a_t	a_n	a	pohyb
$a_t = 0$	$a_n = 0$	$a = 0$	rovnomerný priamočiary; rýchlosť má stály smer aj veľkosť
$a_t = 0$	$a_n \neq 0$	$a \neq 0$	rovnomerný krivočiary (napr. po kružnici, kde $a_n = \text{konšt.}$); veľkosť rýchlosti je stála, smer sa mení
$a_t = \text{konšt.}$ smery a_t a v súhlasné	$a_n = 0$ $a_n \neq 0$	$a \neq 0$	rovnomerne zrýchlený, priamočiary; rýchlosť má stály smer, veľkosť sa mení rovnomerne zrýchlený, krivočiary; smer aj veľkosť rýchlosti sa menia
$a_t = \text{konšt.}$ smery a_t a v opačné	$a_n = 0$ $a_n \neq 0$	$a \neq 0$	rovnomerne spomalený, priamočiary; rýchlosť má stály smer, veľkosť sa mení rovnomerne spomalený, krivočiary; smer aj veľkosť rýchlosti sa menia
$a_t \neq \text{konšt.}$ smery a_t a v súhlasné	$a_n = 0$ $a_n \neq 0$	$a \neq 0$	nerovnomerne zrýchlený, priamočiary; rýchlosť má stály smer nerovnomerne zrýchlený, krivočiary pohyb; smer i veľkosť rýchlosti sa menia
$a_t \neq \text{konšt.}$ smery a_t a v opačné	$a_n = 0$ $a_n \neq 0$	$a \neq 0$	nerovnomerne spomalený, priamočiary; rýchlosť má stály smer nerovnomerne spomalený, krivočiary; smer aj veľkosť rýchlosti sa menia
		$a = \text{konšt.}$	s konštantným vektorom zrýchlenia (napr. pohyb v homogénnom gravitačnom poli)

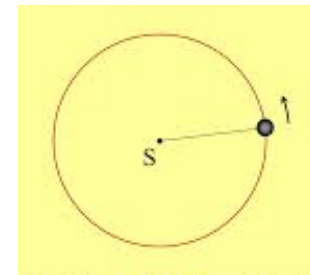


a – celkové zrýchlenie $a = a_t + a_n$
 a_n – normálová (kolmá) zložka zrýchlenia

a_t – tangenciálna (dotyčnicová) zložka

Základné pojmy - mechanika

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.

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

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

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

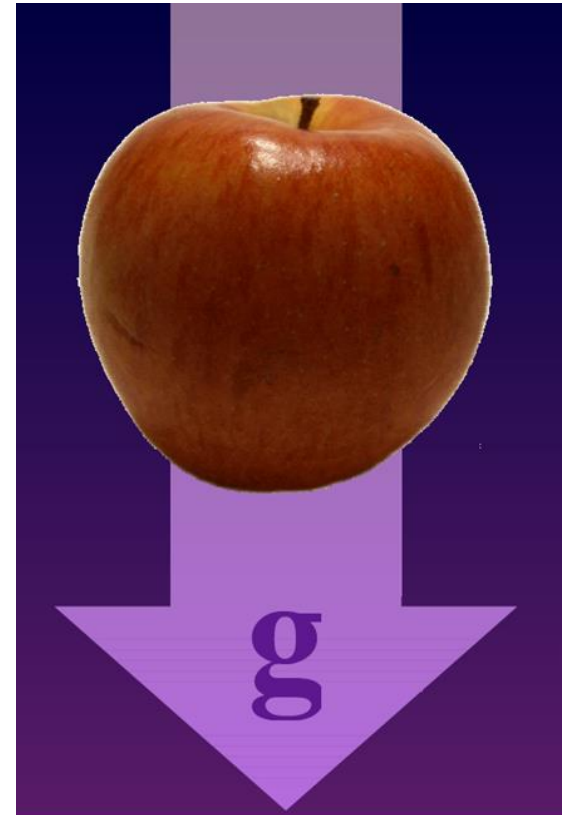
$$\omega = 2\pi/T = 2\pi f$$

Pre obvodovú rýchlosť potom platí:

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

Základné pojmy - mechanika

Voľný pád:



Voľný pád je pohyb voľne pusteného telesa v blízkosti Zeme vo vákuu. Je to priamočiary rovnomerne zrýchlený pohyb (zvislo nadol) s nulovou počiatočnou rýchlosťou a s tiažovým zrýchlením g .

Pre rýchlosť a dráhu pri voľnom páde platia nasledovné vzťahy:

$$v = g \cdot t, \quad s = \frac{1}{2} g \cdot t^2,$$

$$\text{kde } g = 9.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}.$$

Základné pojmy - mechanika

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.



www.shutterstock.com · 60046772

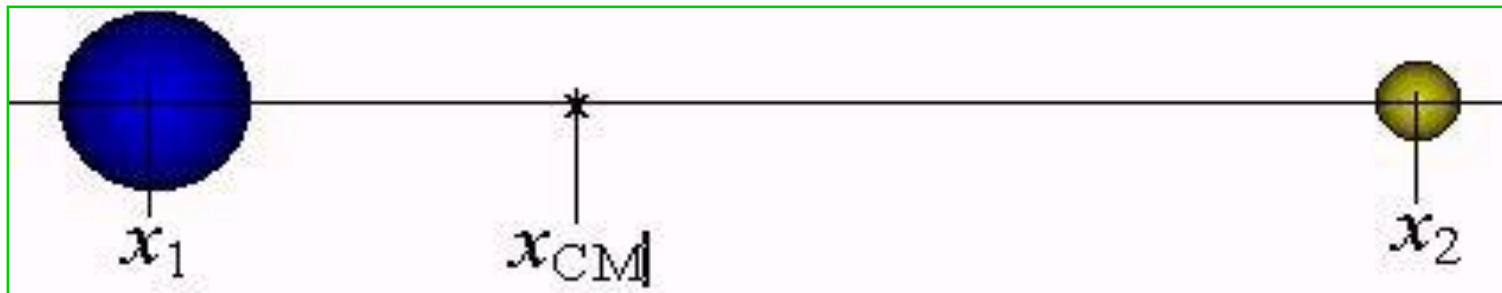
Základné pojmy - mechanika

Ťažisko telesa (alebo sústavy) je bod, ktorý sa pohybuje, ako keby v ňom bola sústredená celá hmotnosť sústavy a pôsobili v ňom všetky sily pôsobiace na sústavu.

Veta o pohybe ťažiska: ťažisko telesa sa pohybuje tak ako hmotný bod s celkovou hmotnosťou telesa pri pôsobení rovnakej sily (síl).

V prípade *jedného* (symetrického) telesa je to jeho stred.

Pre sústavu *dvoch* hmotných telies platí, že ťažisko sústavy sa nachádza na ich spojnici a delí ich vzdialenosť v nepriamom pomere hmotností telies – t.j. je bližšie k väčšej hmotnosti.



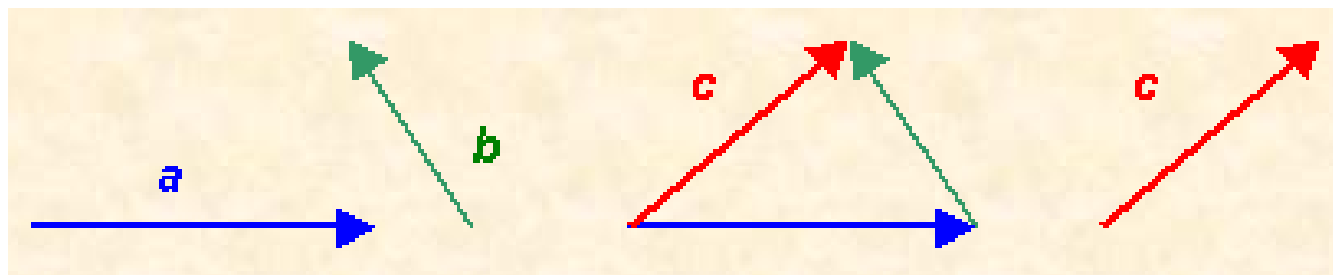
kde sa nachádza ťažisko pohybu dvoch telies – Zeme a Mesiaca?

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).



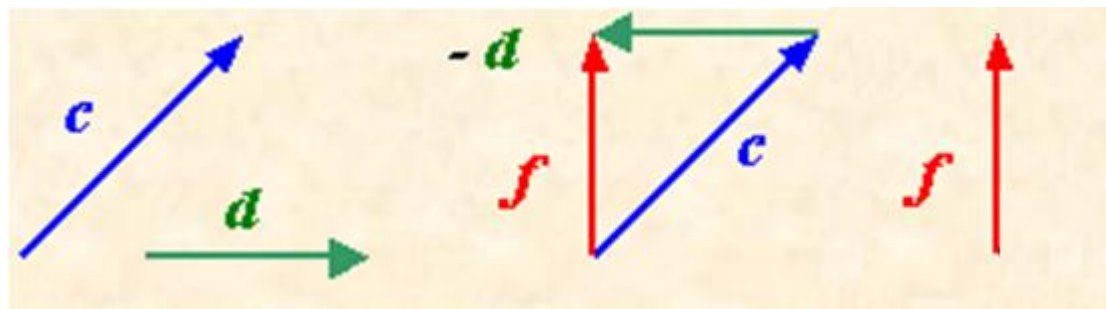
súčet vektorov

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 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ (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).



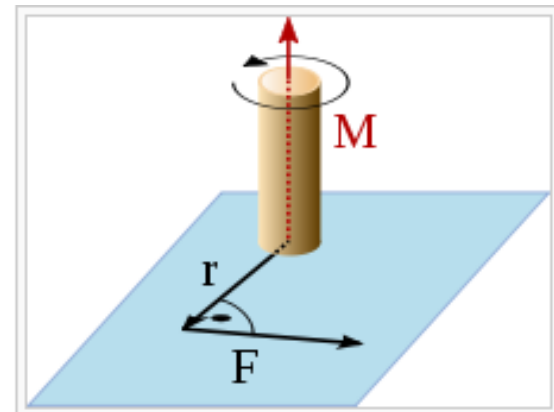
rozdiel vektorov

Základné pojmy - mechanika

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

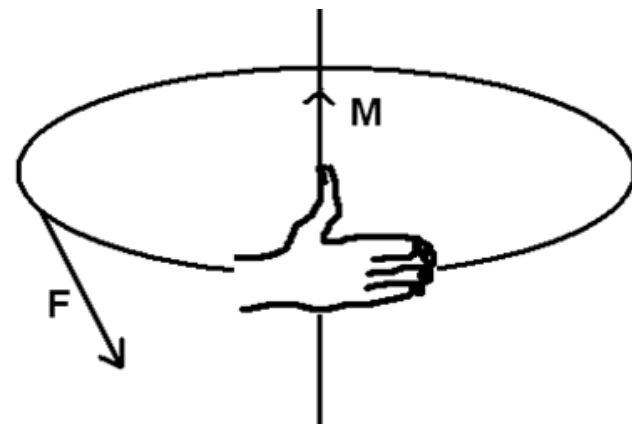
$$\vec{M} = \vec{F} \times \vec{r}$$

je vektorová fyzikálna veličina,
ktorá vyjadruje mieru otáčavého účinku sily.



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.



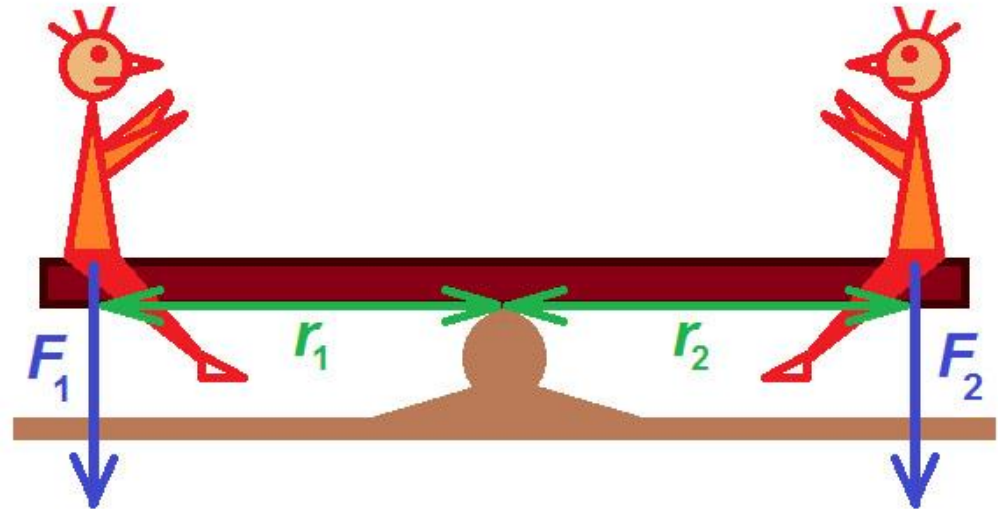
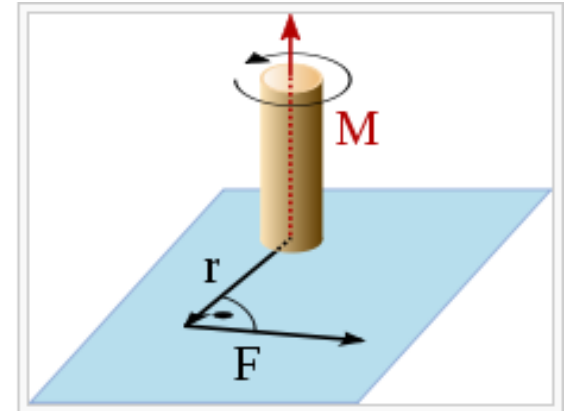
tzv. pravidlo
pravej ruky

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.



Základné pojmy - mechanika

Impulz sily $\vec{I}$, jednotka $\left[\text{N} \cdot \text{s} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}} \right]$

Ak charakterizujeme zmenu pohybového stavu telesa pôsobením sily, treba brať do úvahy nielen veľkosť sily, ale aj čas, po ktorý pôsobí. To reflektuje fyzikálna veličina označovaná ako **impulz sily**.

Táto veličina je vektor – v prípade sily konštantnej v čase bude mať smer tejto sily a veľkosť rovnú súčinu veľkosti sily a času jej pôsobenia:

$$\vec{I} = \vec{F} t$$

kde t je čas [s].



Základné pojmy - mechanika

Impulz sily $\vec{I}$, jednotka $\left[\text{N} \cdot \text{s} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}} \right]$

V prípade sily premennej $\vec{F}(t)$ v čase je to zložitejšie – impulz sily vypočítame integrovaním sily podľa času:

$$\vec{I} = \sum_i \vec{F}_i \Delta t \rightarrow \int_t \vec{F} dt$$

Je to veličina viazaná na časový interval (pôsobenia sily).

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):

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

Vzťah hybnosti a impulzu sily: $\vec{p}_2 - \vec{p}_1 = \vec{I}$

(Impulz sily spôsobuje zmenu hybnosti $\approx$ 1. veta impulzová).

Základné pojmy - mechanika

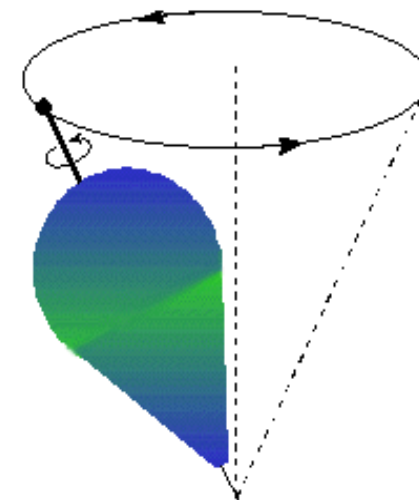
Moment zotrvačnosti (I), jednot $[kg \cdot m^2]$

je skalárna veličina, ktorá vystupuje pri skúmaní jeho otáčavého pohybu.

Úlohou momentu zotrvačnosti je vyjadrovať pohybovú energiu otáčavého pohybu telesa (vrátime sa k tomuto pojmu na ďalšej prednáške).

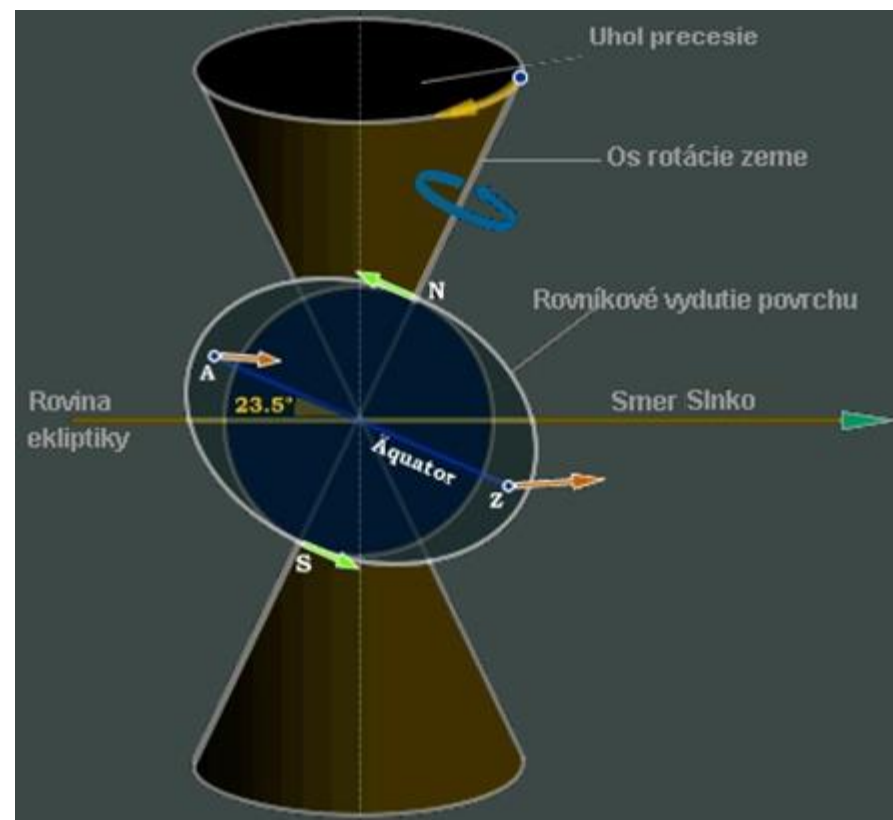
Precesný pohyb:

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.



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. pohybová rovnica: $\vec{F} = m \vec{a}$

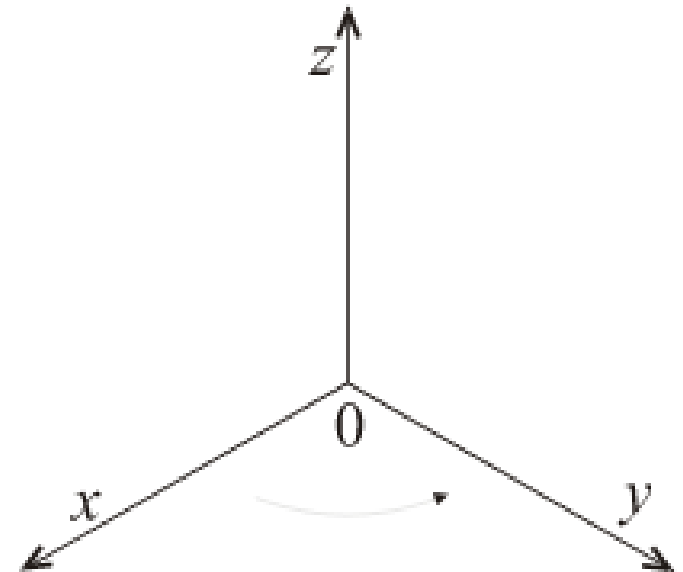
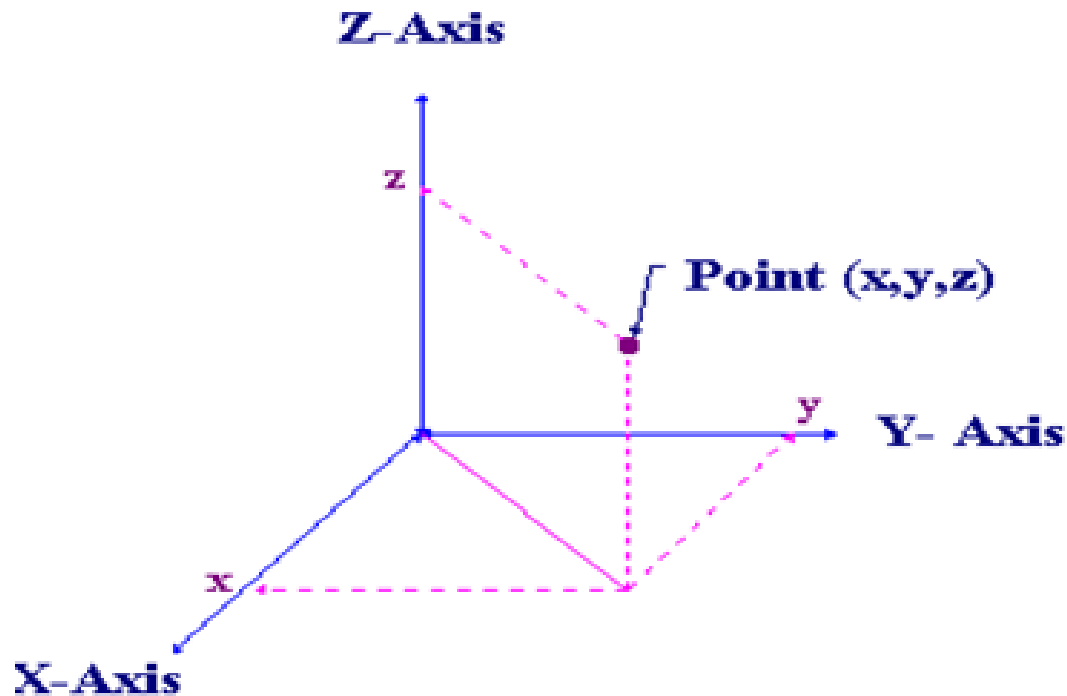
Smer zrýchlenia je totožný so smerom pôsobiacej sily.

3. zákon (zákon akcie a reakcie):

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

základné pojmy - mechanika

Vzt'ážná sústava – zvyčajne **pravouhlá** (*karteziánska*) - (x, y, z)
(existujú aj tzv. krivočiare súradnicové sústavy)
- je to tzv. pravotočivá sústava



Newtonove zákony pohybu:

Vzťažné sústavy, v ktorých Newtonove zákony platia, označujeme ako

inerciálne (inertia = zotrvačnosť). Vzťažné sústavy, v ktorých tomu tak nie je, označujeme ako

neinerciálne – zvyčajne ide o **otáčavé** sústavy, v ktorých sa prejavujú tzv. **zdanlivé (fiktívne) sily**. Toto označenie nie je celkom korektné (žiaľ, zaužívané), nakoľko takéto sily majú reálne príčiny a aj dôsledky (**napr. sila odstredivá**)

Aj vzťažné sústavy na povrchu našej Zeme sú de facto neinerciálne (kvôli rotácii a pohybu Zeme!). Našťastie sú tieto pohyby rovnomerné a zdanlivé sily nimi spôsobené sú veľmi malé – napr. *odstredivá sila* alebo *sila Coriolisova*.

V bežnom živote ich bežne nevnímame (sú ale merateľné).

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 prúdeňí 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 ideálnej 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 tiež výsledok dlhodobého pôsobenia Coriolisovej sily.



Coriolisova sila je daná vzťahom:

$$\vec{F}_C = -2m\vec{\omega} \times \vec{v}.$$

kde m je hmotnosť skúmaného telesa, $\vec{v}$ je rýchlosť telesa v rotujúcej vzťažnej sústave, $\vec{\omega}$ je uhlová rýchlosť rotujúcej sústavy.

gravitačný zákon

prvé úvahy a pokusy snažiace sa pochopiť gravitáciu - od Galilea Galilei:



**Galileo Galilei
(1564 - 1642)**

- voľný pád (podmienенý tiažovým poľom Zeme) je zrýchlený pohyb
- tiažové zrýchlenie g nezávisí od hmotnosti telesa
(na rozdiel od predstáv Aristotela)

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

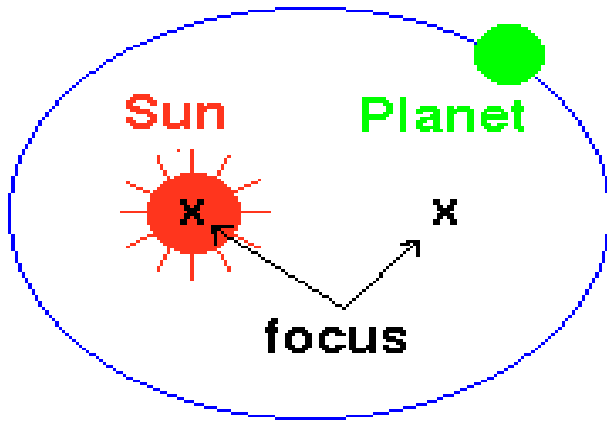


gravitačné zrýchlenie (g):

skalné more – Vyhne (tzv. gravitačné triedenie)



Keplerove zákony pohybu planét:

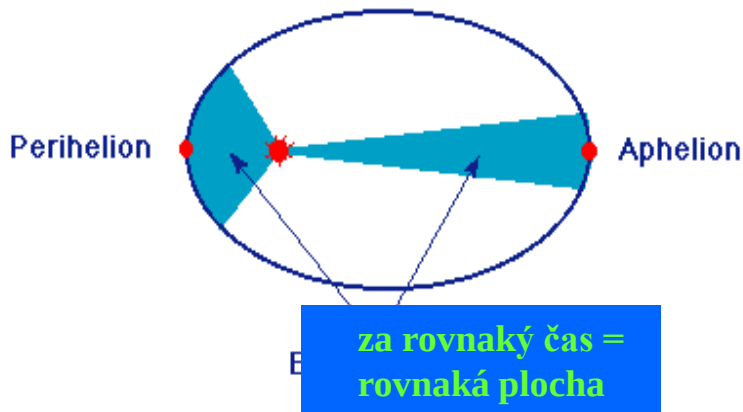


Kepler bol prvý, ktorý opustil filozofický predpoklad kružníc ako dokonalých dráh nebeských telies, považovaný vtedy za samozrejmosť. Toto „zväzovalo ruky“ Kopernikovi.



Johannes Kepler
(1571 - 1630)

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



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 ($P_{1,2}$) sú v rovnakom pomere ako tretie mocniny veľkých polosí dráh ($R_{1,2}$) – pre každú dvojicu telies obiehajúcich okolo toho istého centrálného telesa.

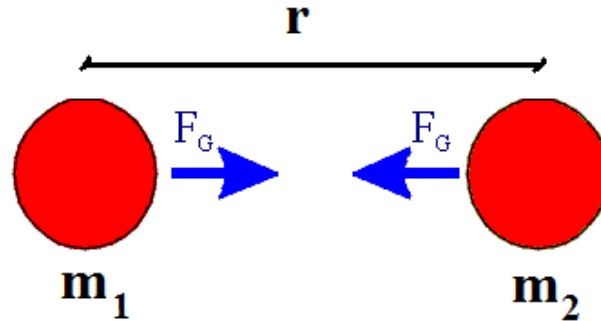
$$\frac{P_1^2}{P_2^2} = \frac{R_1^3}{R_2^3}$$

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 vyplývajú (sú dôsledkom) gravitačného zákona.

Newtonov gravitačný zákon:



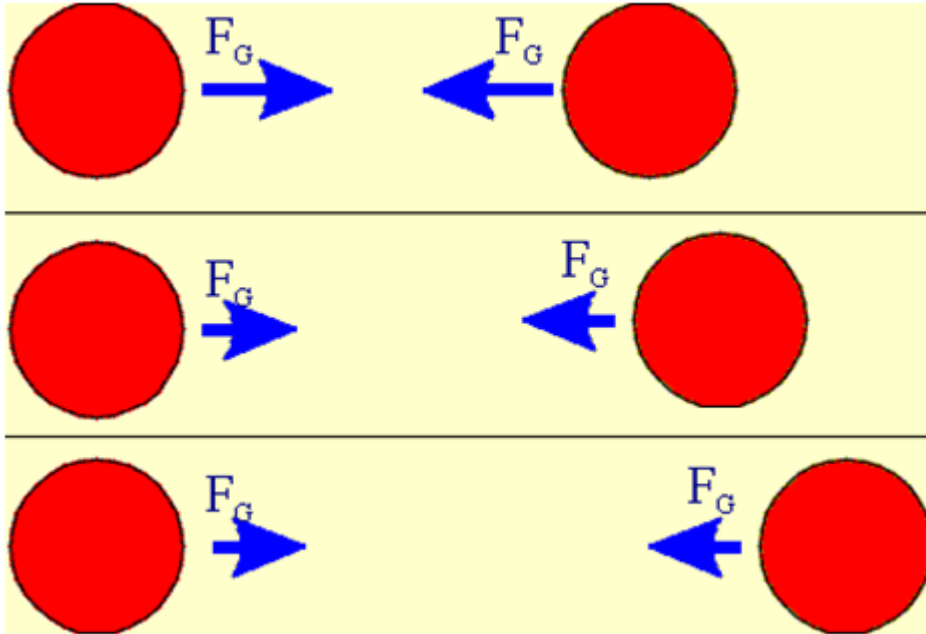
Dva hmotné body s hmotnosťami m_1 a m_2 , ktorých vzájomná vzdialenosť je r , pôsobia na seba príťažlivými silami s hodnotou priamo úmernou súčinu ich hmotností a nepriamo úmernou štvorcu (druhej mocnine) ich vzdialenosti.

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

$$G = \kappa = 6.67 \cdot 10^{-11} \left[\text{N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2} \right]$$

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:

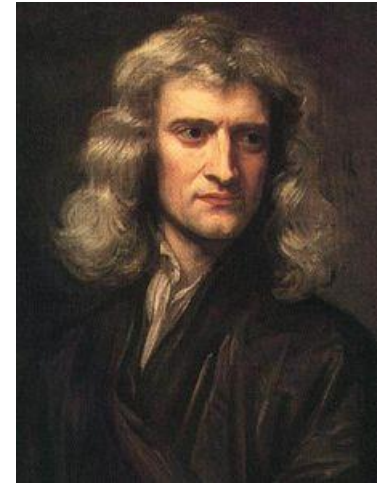


$$F_G = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

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

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.



Isaac Newton
(1643 – 1727)

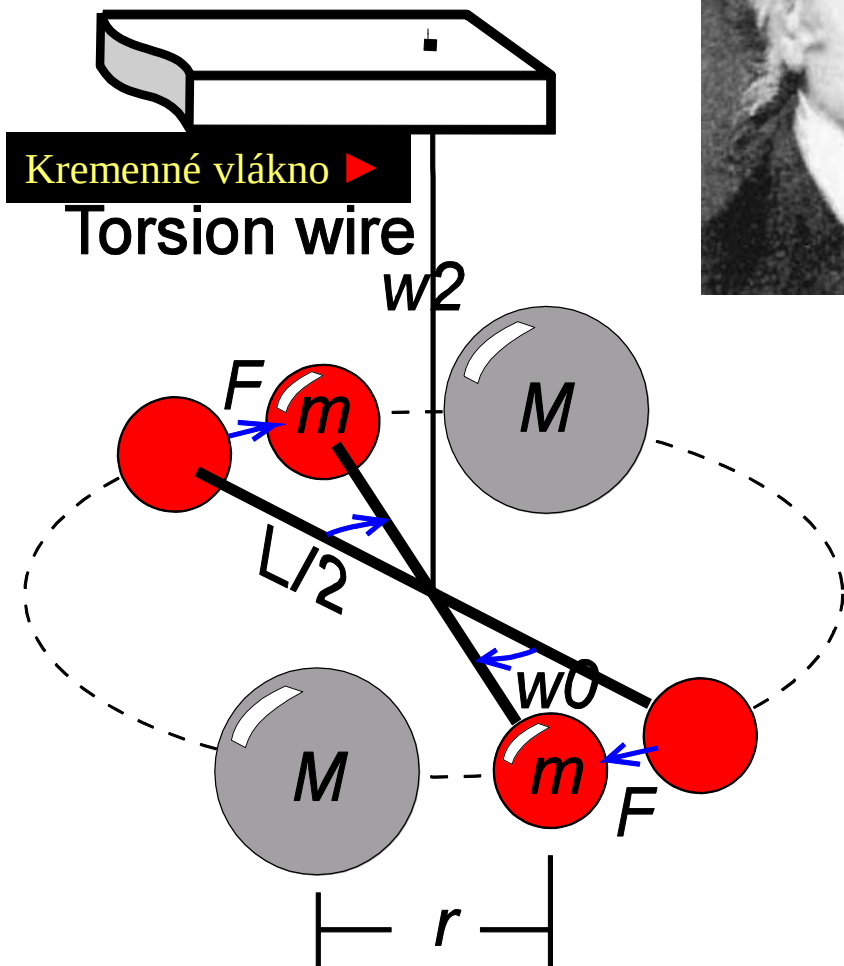
Jeho základné
dielo
*„Philosophiae
Naturalis
Principia
Mathematica“*
vyšlo r.1687



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:

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

z Newtonovho zákona sily
vyplýva pre zrýchlenie **g**:

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

Hodnota g?

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

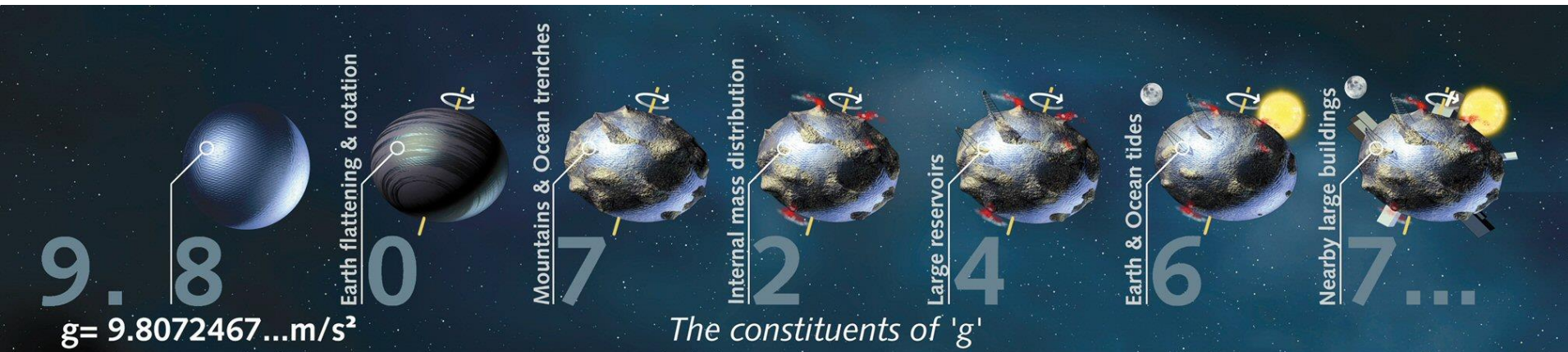
Je možné odhadnúť výpočtom – vid' nasledujúci snímok.

gravitačné zrýchlenie (g):

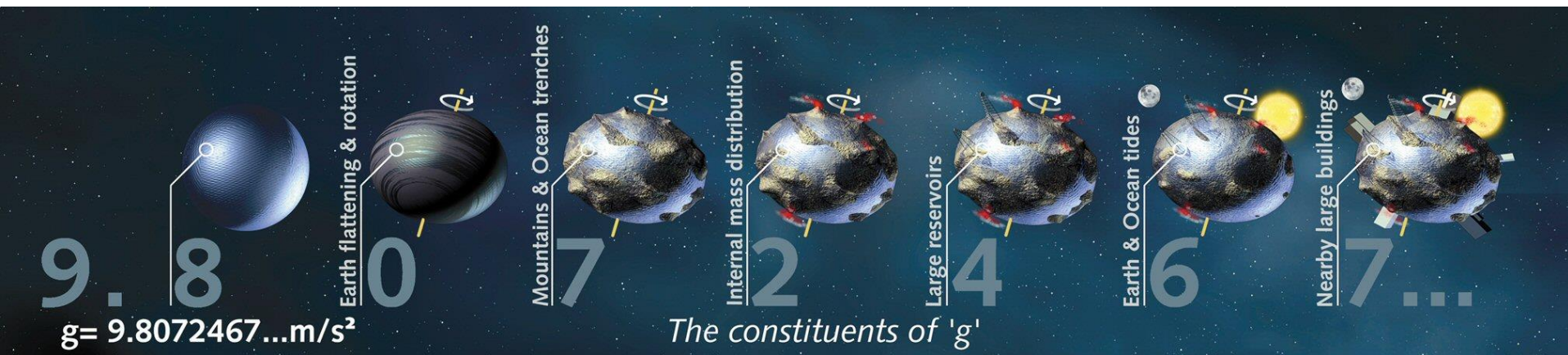
Konkrétna hodnota zrýchlenia – pre Zem:

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

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



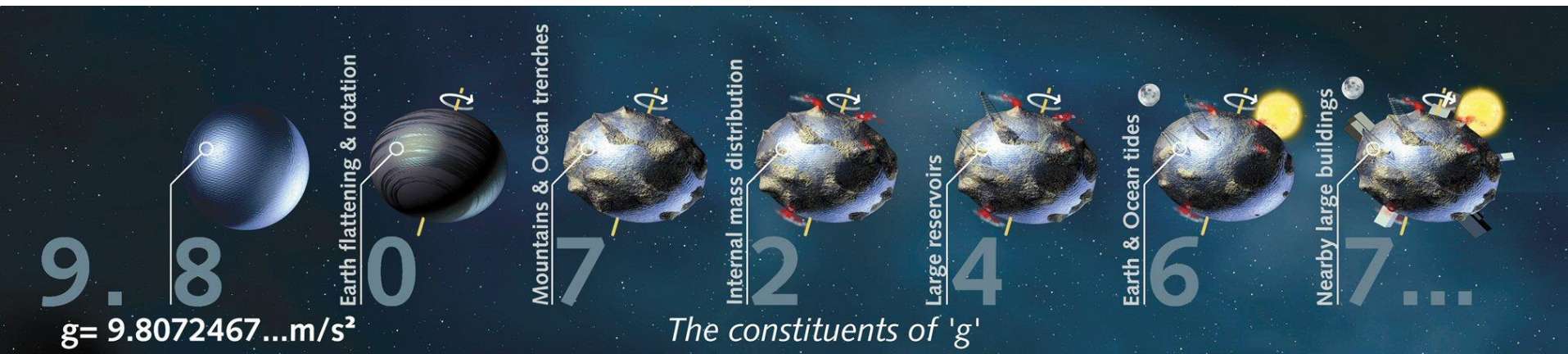
gravitačné zrýchlenie (g):



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 ...)

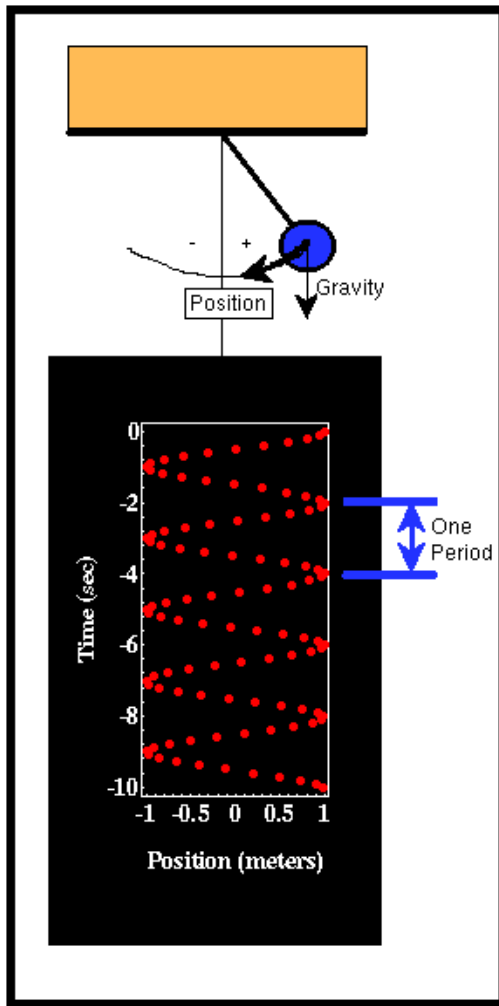
gravitačné zrýchlenie (g):



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 gravitačné zrýchlenie závisí aj od nadmorskej výšky

tzv. matematické kyvadlo:



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

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

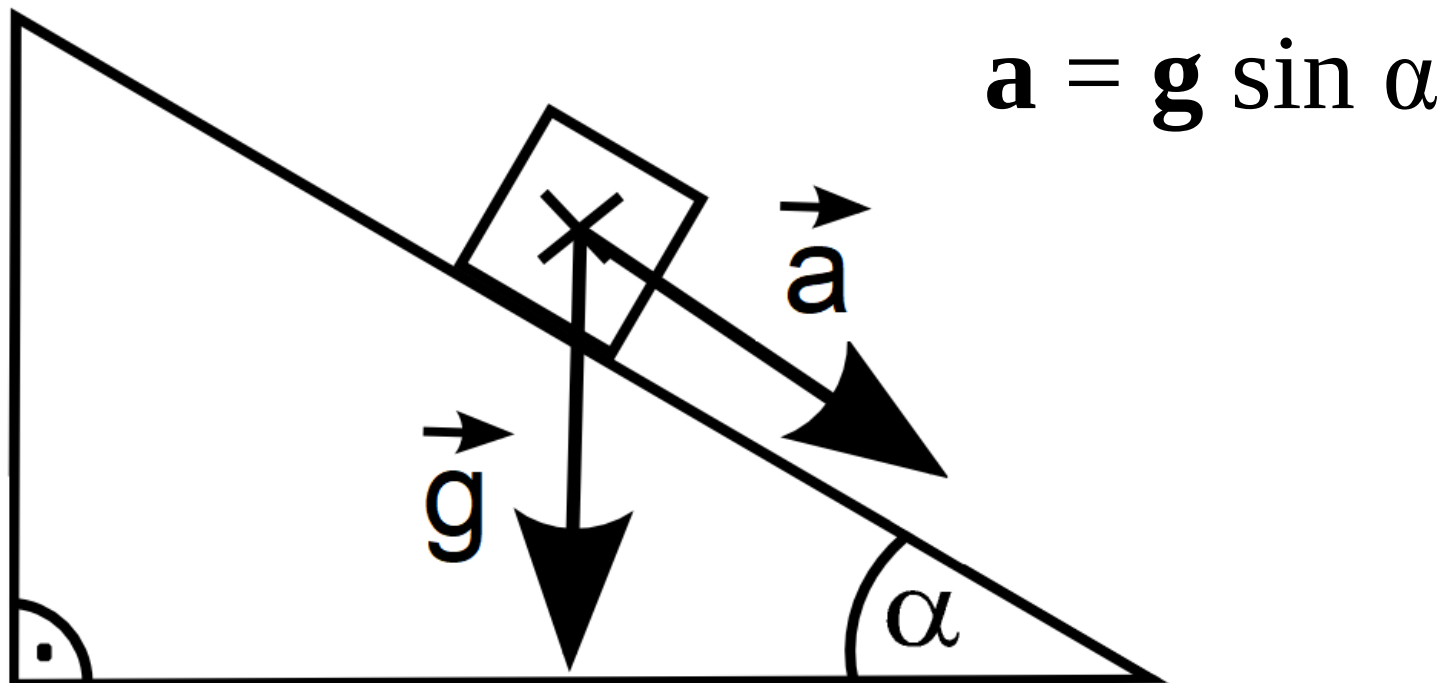
Walter Lewin – přednáška MIT (video),

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

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

pohyb po naklonenej rovine

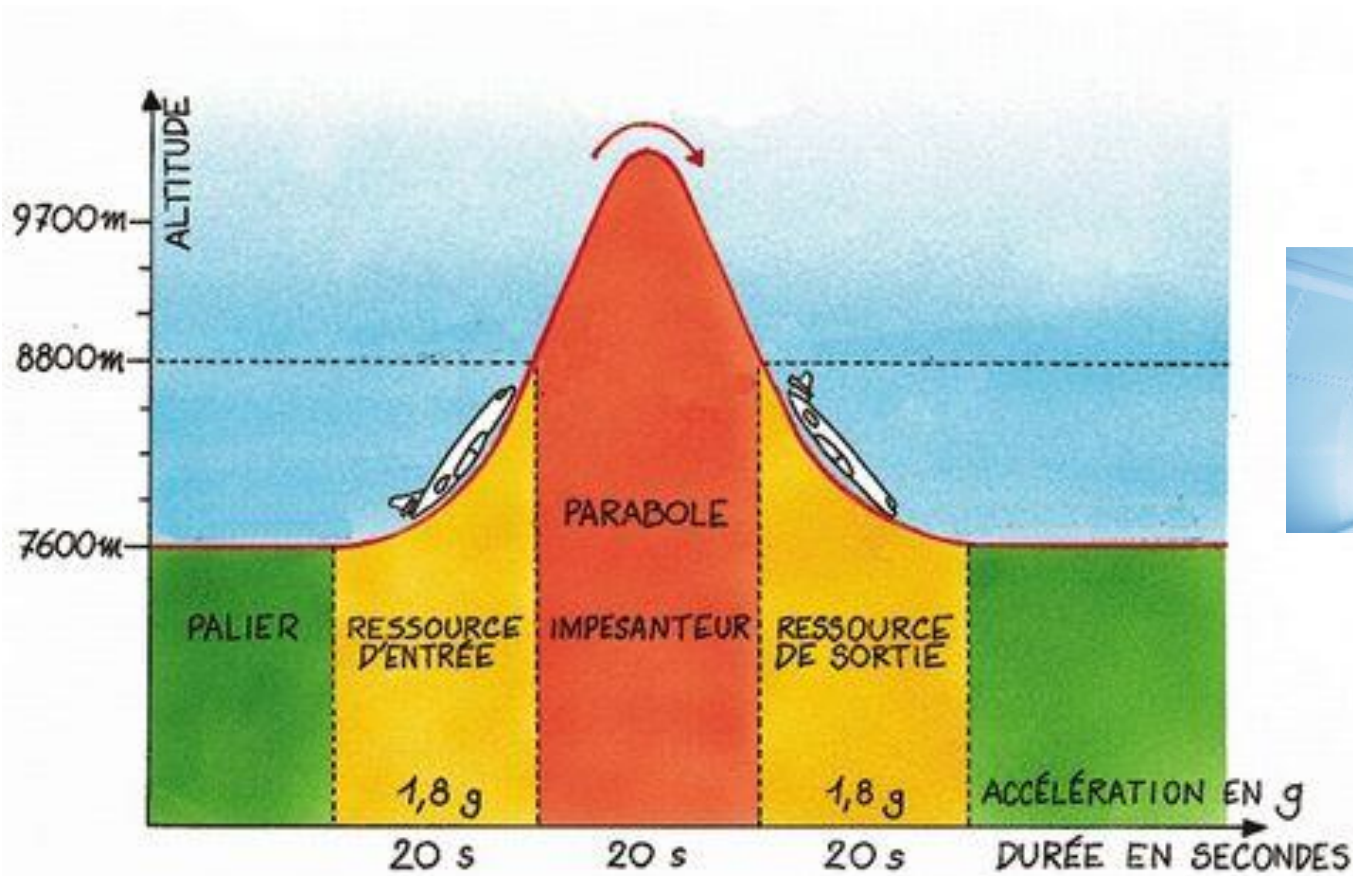
Kĺzavý pohyb po naklonenej rovine:



Pozn.: Inak je to ale pri tzv. valivom pohybe, kde sa uplatňuje pri rotácii telesa tzv. moment zotrvačnosti (a ten už je funkciou hmotnosti).

tzv. parabola nulového G (zero G parable)

simulovanie bezťažového 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>)

Pohyb telesa v gravitačnom poli na **malé vzdialenosti**:

Na malé vzdialenosti (do $\sim 10 - 20$ km nad povrchom Zeme) možno gravitačné (ťažové) pole Zeme považovať za priestorovo homogénne – čiže zanedbať, že smery gravitačnej sily v rôznych bodoch nie sú rovnobežné (lebo smerujú do ťažiska Zeme).

Vtedy možno povedať, že vrhnuté (alebo vystrelené) teleso sa pohybuje po **oblúku paraboly** (samozrejme pri zanedbaní odporu vzduchu) .



◀ stroboskopický záber šikmo hodenej lopty, odrazenej od podlahy.

◀ „parabolické“ oblúky sú vlastne malé časti oblúkov elíps. Tie sú v blízkosti vrcholov od parabol na „nerozoznanie“.

Keby sme Zem nahradili jej celkovou hmotnosťou sústredenou v ťažisku, lopta by opisovala (veľmi excentrickú) eliptickú dráhu okolo neho.

V prípade pohybu na vzdialenosti **porovnateľné s veľkosťou Zeme a väčšie**, dráhou telesa v **centrálnom gravitačnom poli** (ktorého zdrojom je iba **jedno ďalšie teleso**) môže byť iba **kuželosečka** (elipsa, parabola alebo hyperbola) – záleží na počiatočnej rýchlosti.

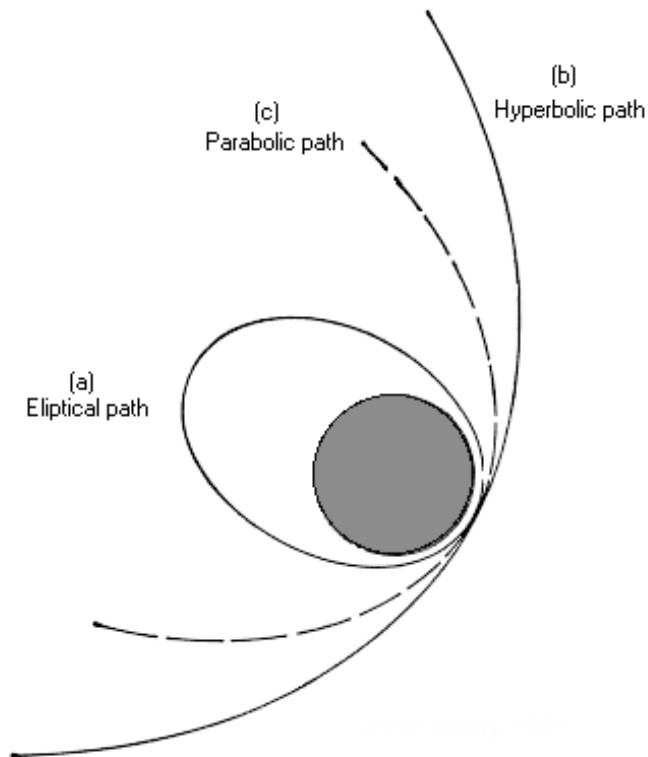
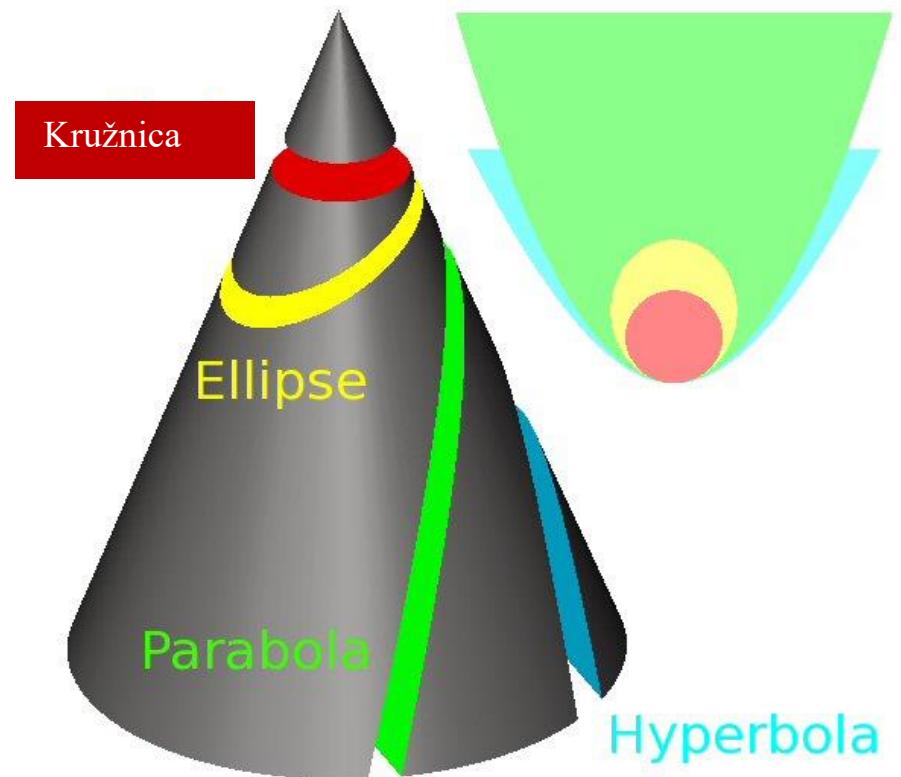
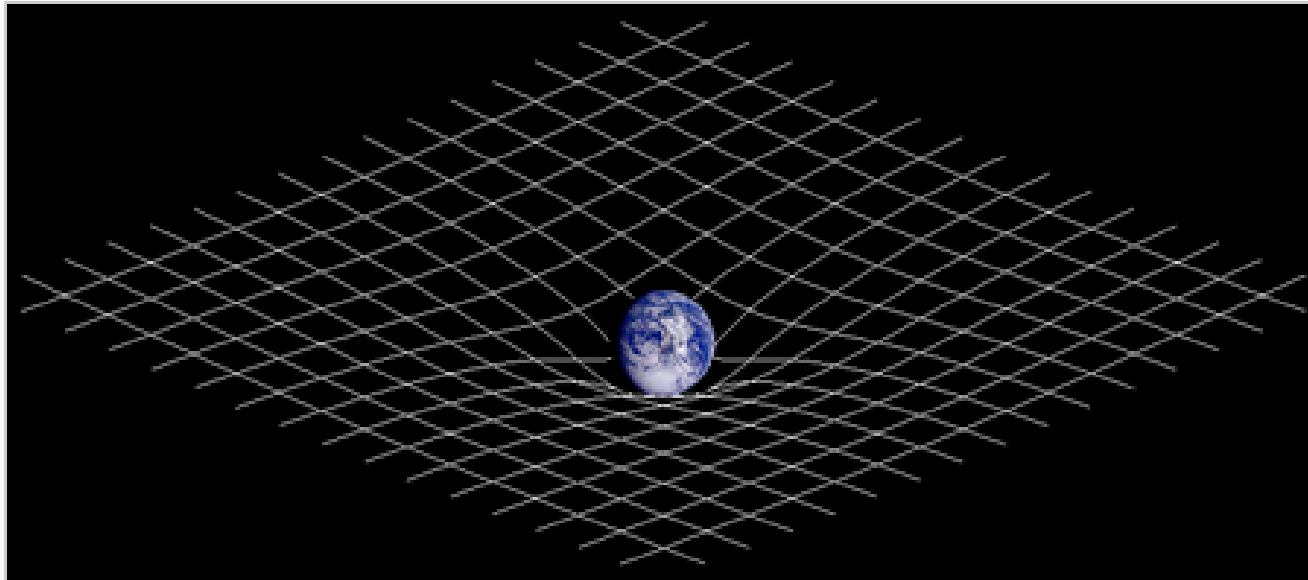


Fig-1: Types of paths

Kuželosečky:



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.