



Meranie tvaru a veľkosti Zeme

Fyzikálna geodézia

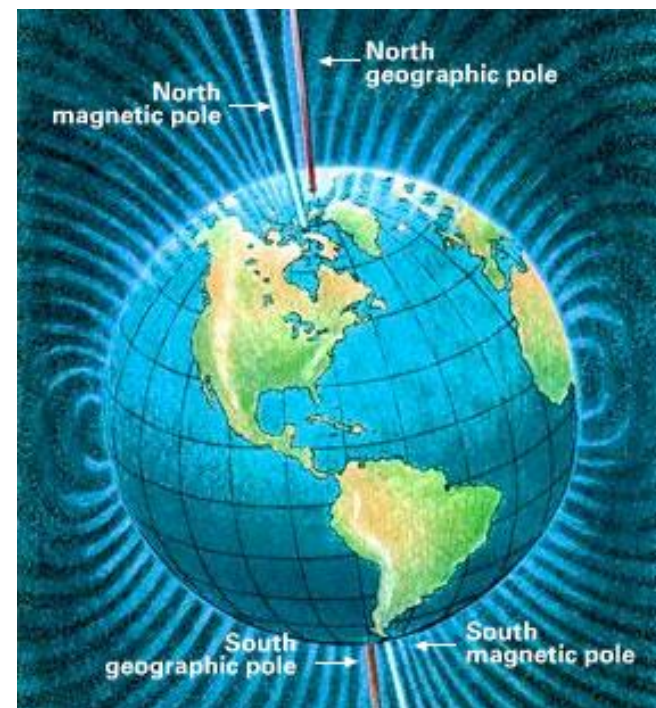
Spresňovanie rozmerov a tvaru Zeme na základe geodetických, astronomických a gravimetrických meraní

GRAVITAČNÉ POLE ZEME

- ▶ Zemské teleso hmotnosti M vytvára nad svojim povrchom gravitačné pole, v ktorom pôsobí Newtonov zákon
- ▶ **Gravitačné zrýchlenie - čistá prít'ážlivosť Zeme**

TIAŽOVÉ POLE ZEME

- ▶ Priestor, v ktorom pôsobí zemská tiaž G , a ktorý charakterizuje tiažové zrýchlenie. Vzniká vplyvom rotácie Zeme
- ▶ **Tiažové zrýchlenie - prít'ážlivosť Zeme, spôsobená rotáciou hmotnej Zeme a odstredivým zrýchlením**
- ▶ Je menšie ako gravitačné zrýchlenie



Geofyzika

- ▶ Zaoberá sa hustotným rozložením zemského vnútra na základe tiažových rozdielov odmeraných na zemi, v mori, vo vzduchu a vo vesmíre

Aplikácia

- ▶ v baníckom prieskume, pri prieskume ložísk ropy a zemného plynu
- ▶ výskum a riešenie tektonických procesov
- ▶ vnútorné rozloženie litosferických dosiek a ich hraníc
- ▶ vyzdvihnutie pohorí po roztopení ľadovca
- ▶ hustotné rozloženie vo veľkých sedimentálnych panvách na pevnine a v oceánoch



Gravimetria

- ▶ Odbor fyzikálnej geodézie a geofyziky, ktorý sa zaoberá štúdiom a meraním tiažového poľa Zeme
 - ▶ Gravimetre – prístroje na meranie tiažového zrýchlenia
 - ▶ absolútne
 - ▶ relatívne
 - ▶ Skutočné tiažové zrýchlenie meriame na fyzickom povrchu gravimetrami
 - ▶ Normálne tiažové zrýchlenie je definované na elipsoide a počíta sa
 - ▶ Teória potenciálu – určenie tiažového zrýchlenia ako gradientu potenciálu zemskej tiaže
-



Tvar Zeme

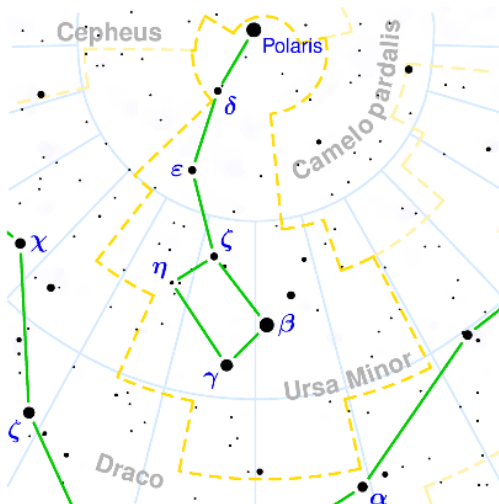
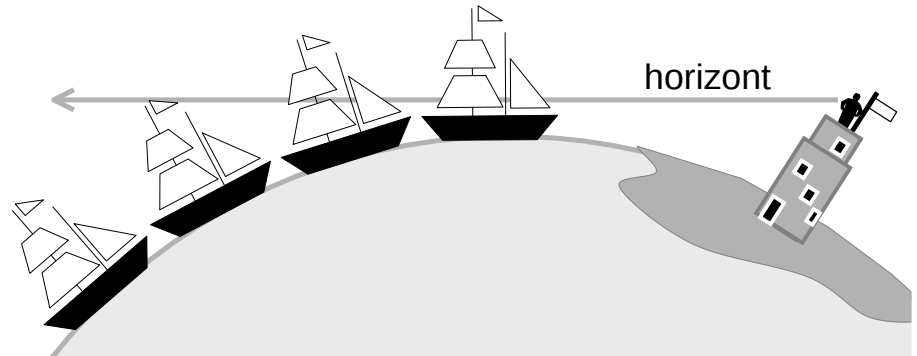
Pythagoras (582 p.n.l.)

Zem má tvar gule

Aristoteles, 4 stor p.n.l.

Zatmenie mesiaca

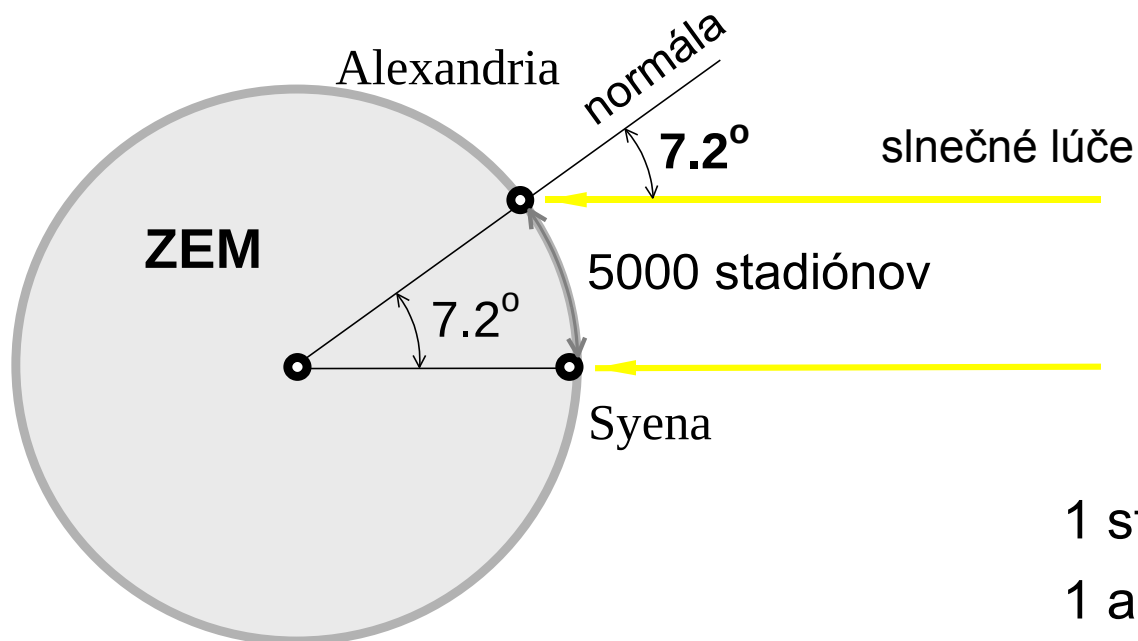
Zmena výšky polárky nad horizontom,
zistená pri plavbe



Eratosthenés Kyrénský (276-195 p.n.l)
Asuán-Alexandria (slnko) - $R=7423,57$ km

Obvod Zeme 250 000 stadiónov (chyba ± 10 %), čo je
asi 39 000 až 47 000 km

Polomer Zeme je 6250 až 7400 km



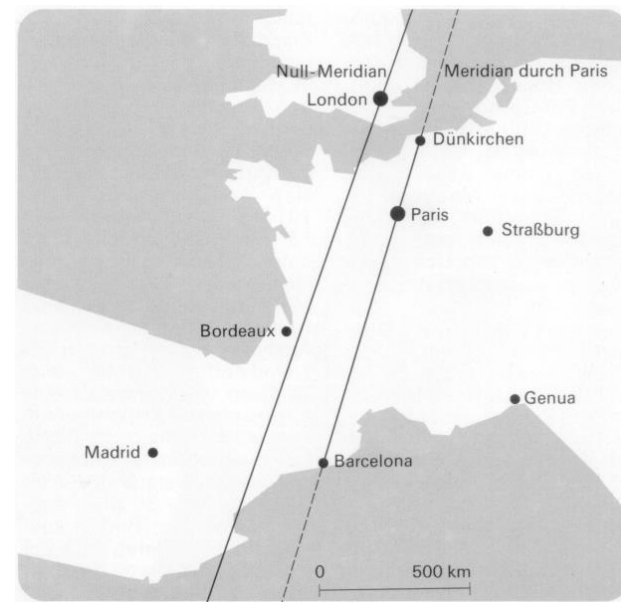
1 stadión = 150 až 200 m

1 antický stadión = 185 m

1 egyptský stadión = 157.5 m

Stupňové merania

- ▶ Poseidonos (135-50 BC)
 - ▶ Alexandria- Rhodos (hviezda Canopus) – $R=5300$ km
 - ▶ Jasná hviezda Canopus sa na Rhodose dotýka obzoru ale v Alexandrii je o $7,5^\circ$ vyššie
- ▶ Arabi pri Bagdade (827 n. l.) oblúk poludníka odmerali čiernym lakt'om Amplitúda 2° , $R=6480$ km
- ▶ Fernel (1525) Paríž-Amiens – Fernelov oblúk (6380 km) $111,286$ km odpovedá 1° zemepisnej šírky



Odvodenie metra

1. Desat'milióntina poludníkového kvadrantu je metre (Delambre 1800)

$$111\,286\text{ m} \cdot 90 = 10\,015\,740\text{ m}$$

1. Medzinárodný prototyp metra vyrobený z platinoirídiovej zliatiny (90% + 10%) a definovaný ako vzdialenosť dvoch vrypov (1889 Sévres pri Paríži)
2. Meter je dĺžka rovnajúca sa 1 650 763,73 vlnovej dĺžky žiarenia šíriaceho sa vo vákuu, ktoré zodpovedá prechodu medzi hladinami 2p10 a 5d2 atómu Kryptónu 86 (1960)
3. Dĺžka dráhy, ktorú prekoná svetlo vo vákuu počas 1/299 792 458 sekundy (1983):

$$1\text{ m} = c/299\,792\,458\text{ s}$$



Kostol Saint Sulpice - Paríž

Do r. 1888 nultý poludník – darovaný Anglii zato, že prijmú metrický systém
Astronomický gnomón (namiesto teleskopu) – meranie polohy Slnka –
presné určenie termínu Veľkonočných sviatkov

Tvorí ho zvisle postavená tyč zakončená ihlanom. Smer tieňa, ktorú vrhá tyč
na plochu pod ňou, udáva azimut. Dĺžka tieňa závisí od výšky telesa
vrhajúceho tieň. Pomocou gnómonu sa dá určiť sklon ekliptiky k rovníku, čas
slnovratu a rovnodennosti, dĺžka roka a môže byť použitý aj ako slnečné
hodiny



Gerardus Mercator prvé moderné a presné mapy 1537

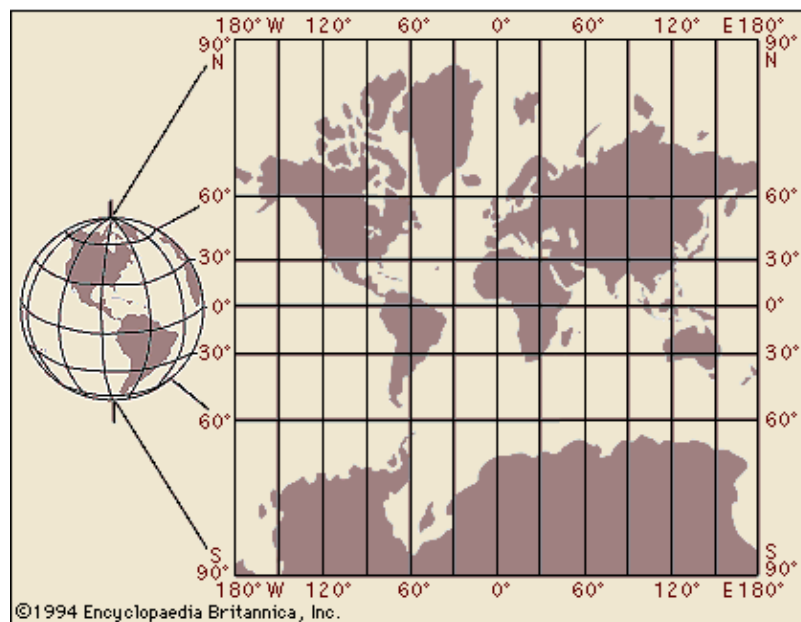
Zmenšil Stredozemné more a zväčšil svet.

Problémy s inkvizíciou, 7 mesiacov vo väzení

Vydáva súbor rozstrihaných máp → **atlas**

1578 prvý diel (opravené Ptolemaiove mapy)

1569 Mercatorova projekcia, oblúbená u námorníkov



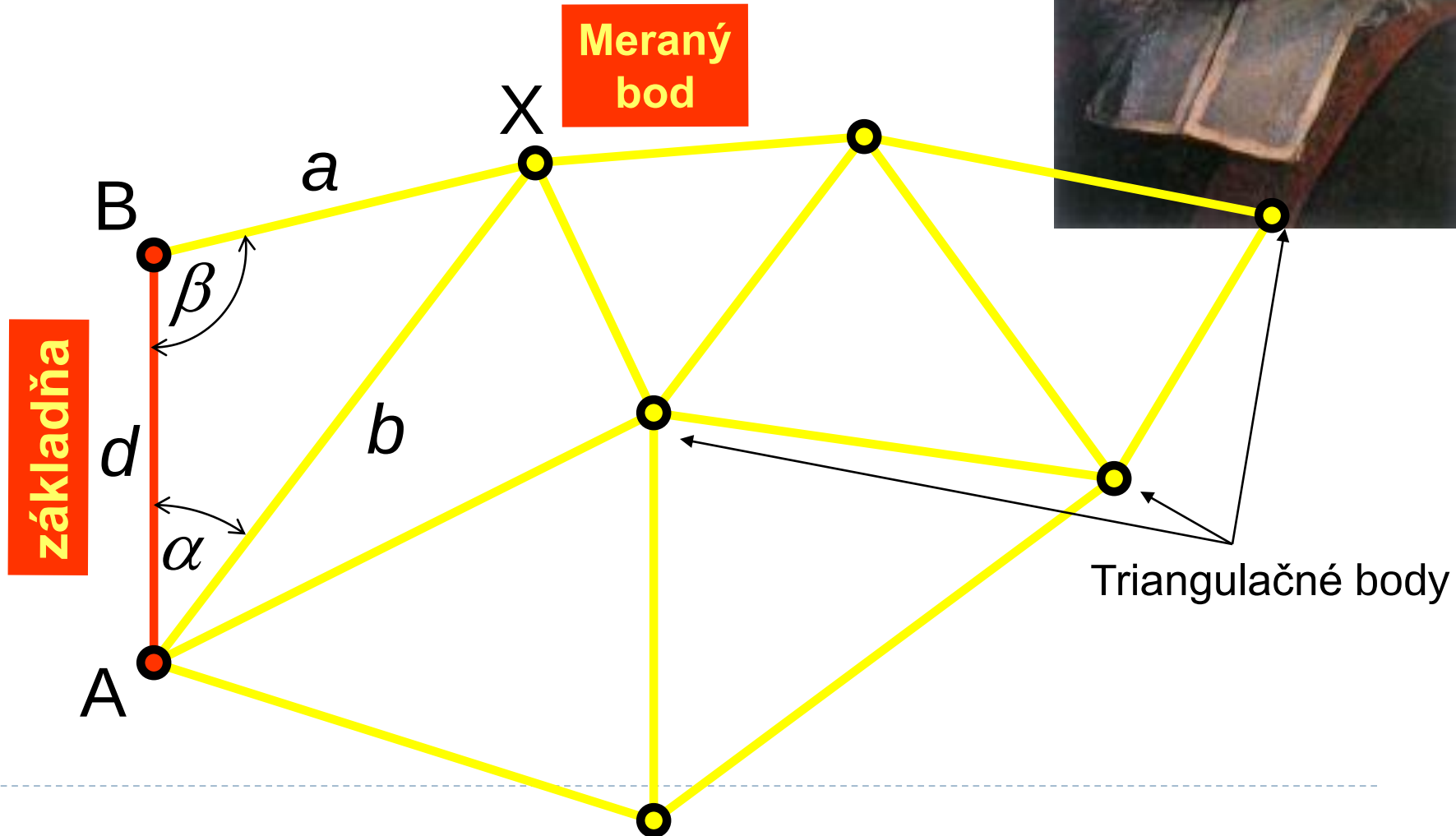
Willebord Snellius, 1615-1622

Prvá triangulácia na odmeranie Zeme

33 trojúholníkov, posledná strana 150 km

$1^\circ \gg 107 \text{ km}$ a $R \gg 6150 \text{ km}$

Prvá triangulačná sieť

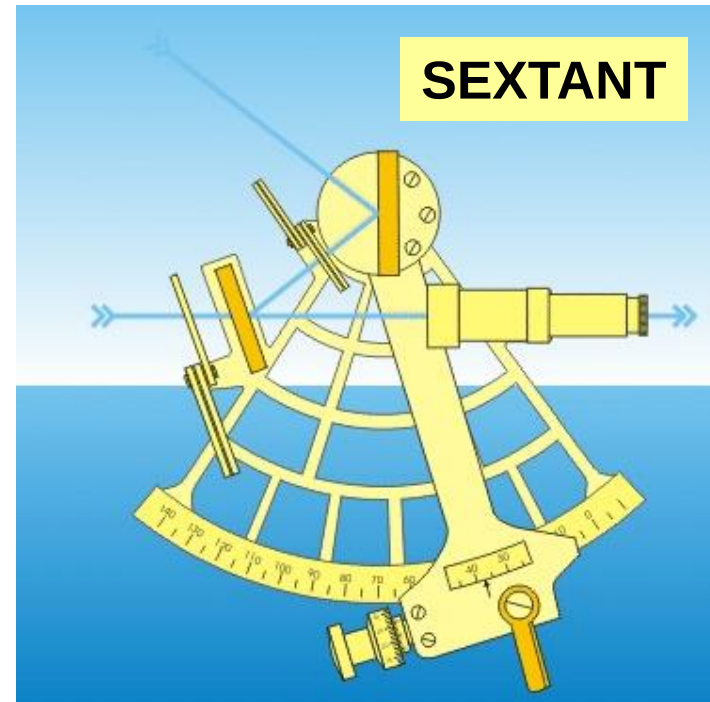


Navigácia

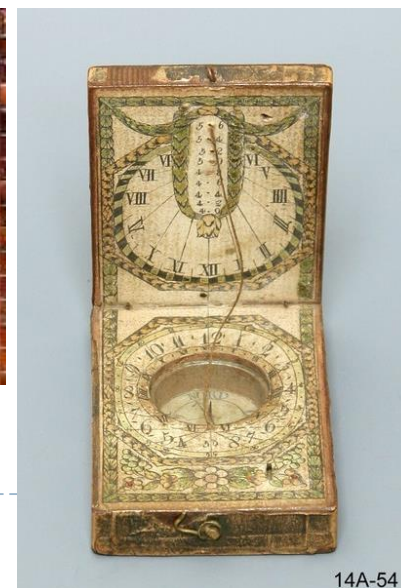
17. a 18. stor. rozmach
námornej dopravy a obchodu

Rastie význam navigácie

Znalosť polohy vyžaduje odmerať
**zemepisnú šírku pomocou
sextantu** (výška Polárky) **a určiť
zemepisnú dĺžku** (vzdialenosť od
nultého poludníka) **pomocou
merania času**



Slnečné hodiny



Ako sa meria zemepisná dĺžka?



Porovná se miestny čas a svetový čas

1 hodina rozdielu predstavuje 15° zemepisnej dĺžky

Presné hodiny odolné otrasom na lodi a zmenám teploty a vlhkosti

Meranie polohy pomocou GNSS

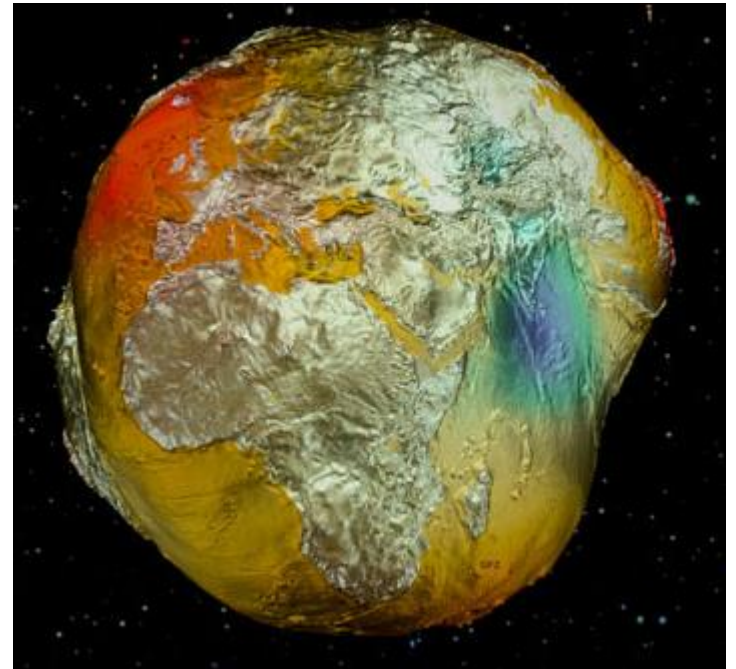
- ▶ Chyba v polohe vplyvom časového oneskorenia signálu
- ▶ Časový signál minimálne zo 4 satelitov, po korekciách na **relativitu** a **refrakciu** v ionosfére prijímač vyhodnotí polohu
- ▶ Chyba hodín < 30 ns
- ▶ Čas na zemi beží 1.0000000005 x pomalšie, to predstavuje chybu za deň $0,00004$ s
- ▶ Prvé satelity 1978 nemali relativistickú korekciu za deň tak vznikala chyba v polohe



Atómové hodiny

Tvar Zeme

- ▶ Odstredivá sila rotácie spôsobila, že Zem je na póloch sploštená
- ▶ Rovníkový priemer Zeme je 12 756,284 km, čo je o 42,77 km viac ako polárny priemer
- ▶ Dôsledkom odstredivej rotačnej sily vzniká tiažové zrýchlenie, ktoré je nepatrne menšie na rovníku ako na póloch
- ▶ Hmotnosť Zeme je $5,974 \cdot 10^{24}$ kg, čo je iba 1/3 000 000 hmotnosti Slnka



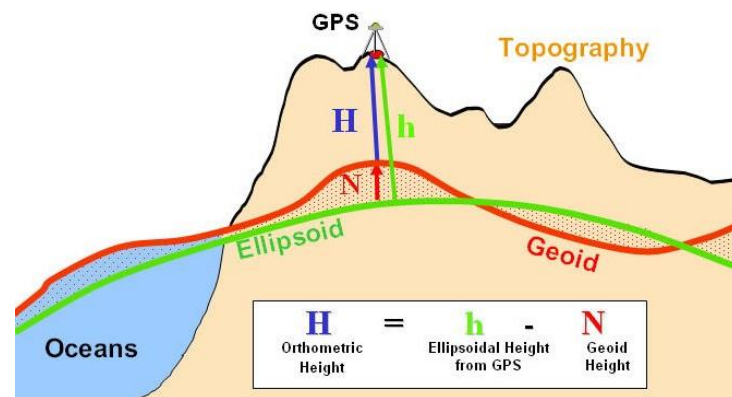
Určovanie tvaru Zeme

- ▶ Geometricky
 - ▶ Globálna geodézia - dĺžka poludníka, dĺžka rovnobežky, sférický trojuholník, dĺžka geodetickej čiary a pod.
- ▶ Geodeticky
 - ▶ Globálne navigačné satelitné systémy
 - ▶ Presná nivelácia
- ▶ Fyzikálne
 - ▶ Gravimetria - meranie tiažového poľa Zeme
 - ▶ Teória potenciálu
- ▶ Satelitné systémy
 - ▶ Zo zakrivenia dráh umelých družíc (kozmickej geodézia)
 - ▶ V súčasnosti najpresnejší spôsob určovania tvaru Zeme



Geoid (grécky geoidés = podobný Zemi)

- ▶ Uzavretá hladinová plocha, ktorá sa zhoduje s priebehom hladín oceánov a prechádza nulovým výškovým bodom
- ▶ Rešpektuje hustotu a objemové vlastnosti zemskej kôry
- ▶ Mení sa v závislosti od gravitačného poľa Mesiaca a Slnka, presunu pevninových, vzdušných a vodných mäs
- ▶ Ak zavedieme predpoklad, že nepoznáme rozloženie látok nad geoidom a nepoznáme skutočné tiažové pole medzi geoidom a povrchom Zeme (Stokes – Regularizovaný geoid)



Kvazigeoid

- ▶ Blízky geoidu (odľahlosť asi 2m)
- ▶ Priebeh kvazigeoidu sa určuje geodetickými, astronomickými a gravimetrickými meraniami
- ▶ Body kvazigeoidu dostaneme odmeraním normálnych výšok
 - ▶ (nivelačné + gravimetrické merania)
- ▶ Jeho presnosť je obmedzená presnosťou merania
- ▶ V oblasti oceánov splýva s geoidom





Rotácia Zeme



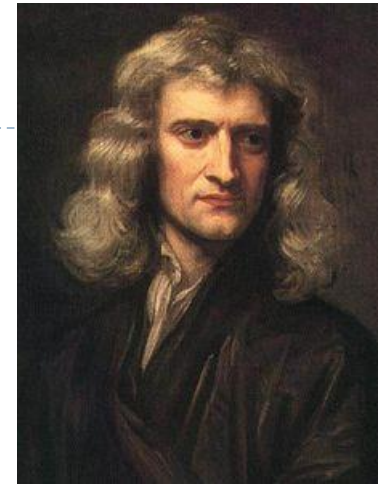
Gravitačná sila F (príťažlivá)

Rýchlosť rotácie Zeme okolo svojej osi je takmer konštantná **465,11 m/s** resp. **1670 km /h** na rovníku

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

Gravitácia, ktorá je v mikrosвете zanedbateľná, vo vesmíre je rozhodujúcou silou

Gravitácia je sila centrálna a pôsobí vždy v smere spojnice ťažísk (hmotných stredov) oboch telies



Newtonov gravitačný zákon
(Isaac Newton 1643–1727)

$$F_p = -G \frac{M.m}{r^2}.$$

$$G = 6,67.10^{-11} N m^2 kg^{-2}$$



Gravitačná konštanta

Napriek pokroku meracej techniky je gravitačná konštanta dodnes najmenej presne určenou fyzikálnou konštantou, iba na 4 desatinné miesta

Presné merania sú veľmi náročné

V astronómii a kozmonautike (výpočty dráh) sa pracuje so súčinom $G.M$, čo je *geocentrická konštanta*, kde M je hmotnosť príslušného telesa (napr. Zeme)

Hodnoty týchto súčinov sú známe s oveľa vyššou presnosťou.



Určenie G torznými váhami

Cavendish v r. 1789 ako jeden z prvých vedcov presne vypočítal hmotnosť Zeme.

Použil torzné váhy, pomocou ktorých odmeral gravitačnú silu pôsobiacu medzi olovenými guľami a odvodił gravitačnú konštantu a z nej hmotnosť Zeme.

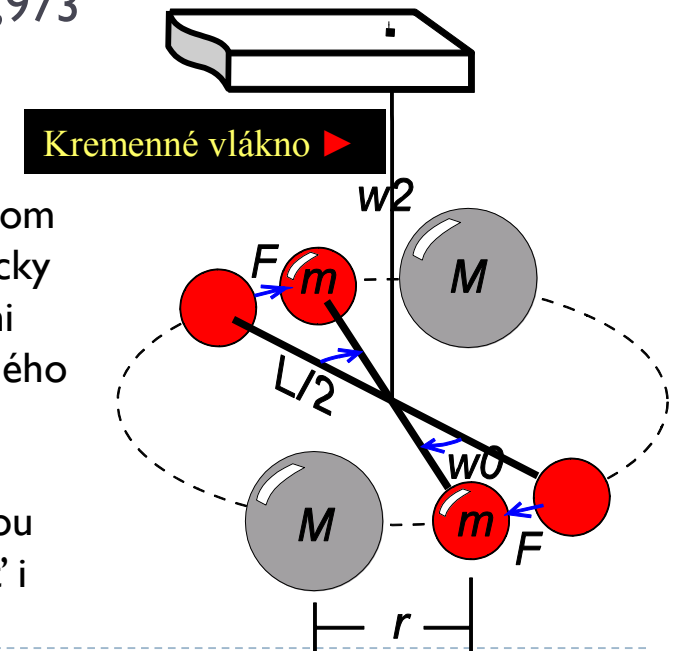
Jeho výpočty boli spresnené až v 20. storočí.

V súčasnosti najlepší odhad hmotnosti Zeme je asi 5,973 zettaton ($5,973 \times 10^{24}$ kg), čo je odchýlka od Cavendishovho merania asi 1 %.

Keď zavesíte na strunu malé závažie a trochu ním zatočíte, potom budete po jeho uvoľnení pozorovať, že struna sa bude periodicky krútiť na obe strany, a to veľmi dlho. Na jej krútenie stačí veľmi malá sila, ktorú jej dodáva počas pokusu zotrvačnosť roztočeného telesa. Moment sily vyvolávajúcej točenie klesá so štvrtou odmocninou z polomeru struny, preto je pri polomere struny rádovo v desatinách milimetra veľmi malý. Máme tak pred sebou najcitlivejšie mechanické zariadenie umožňujúce merať veľkosť i nepatrnej sily. Sú to **torzné váhy**



(Henry Cavendish 1731-1810)





Precesia Zeme



Precesia Zemskej osi

Zem je obrovský zotrvačník.

Účinkom gravitácie Mesiaca a Slnka os Zeme vykonáva precesný pohyb po povrchu symbolického kužeľa, ktorého os je kolmá na ekliptiku (rovinu obehu Zeme okolo Slnka).

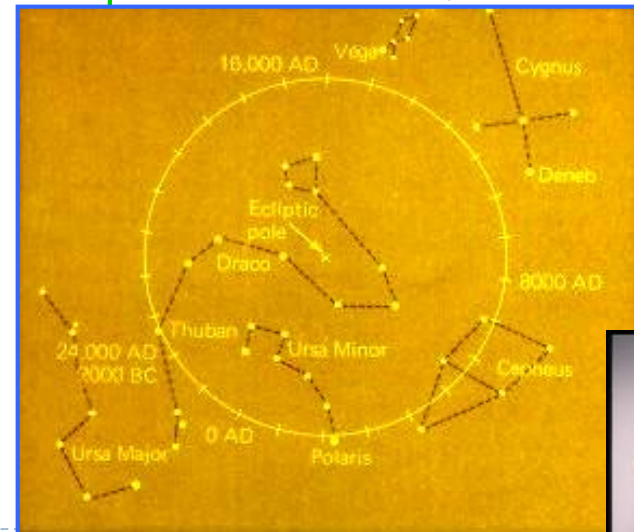
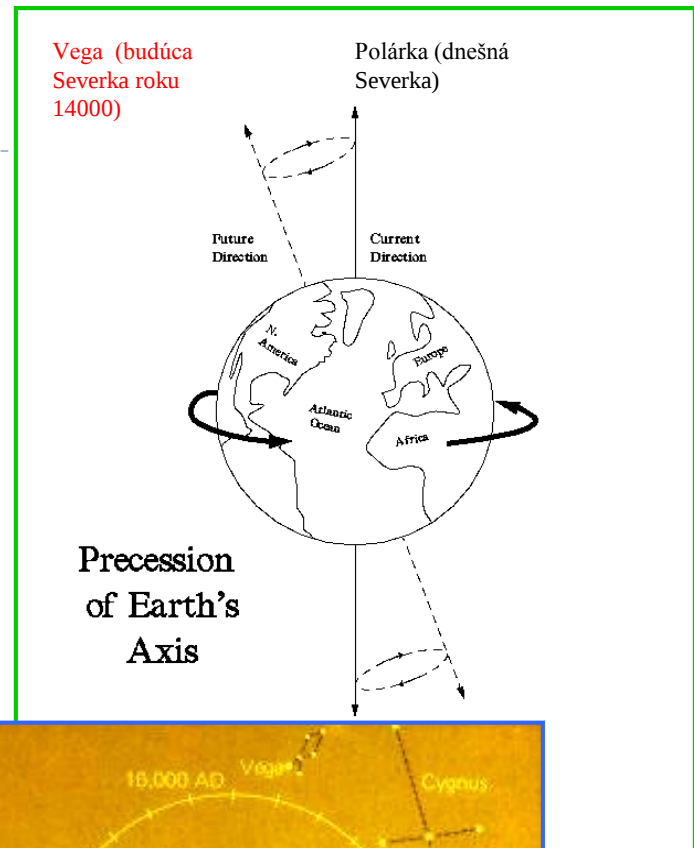
Vrcholový uhol je približne 47° .

Tento jav objavil už v antickom Grécku okolo r. 150 pred Kristom astronóm *Hipparchos*.

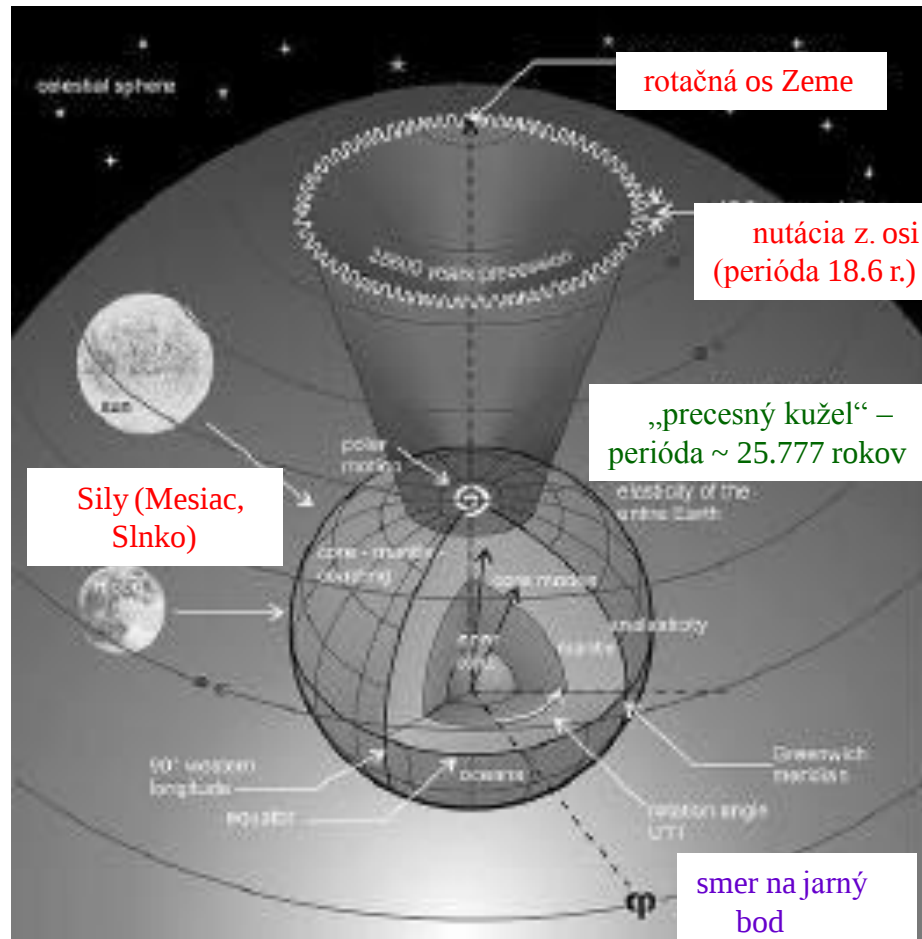
Úplnú otočku vykoná zemská rotačná os za 25 780 rokov.

Dnes sa nebeský severný pól nachádza v blízkosti Polárky.

Okolo roku 14 000 bude „Polárkou“ jasná hviezda Vega a okolo r. 27 800 sa vráti severný pól k našej dnešnej Polárke



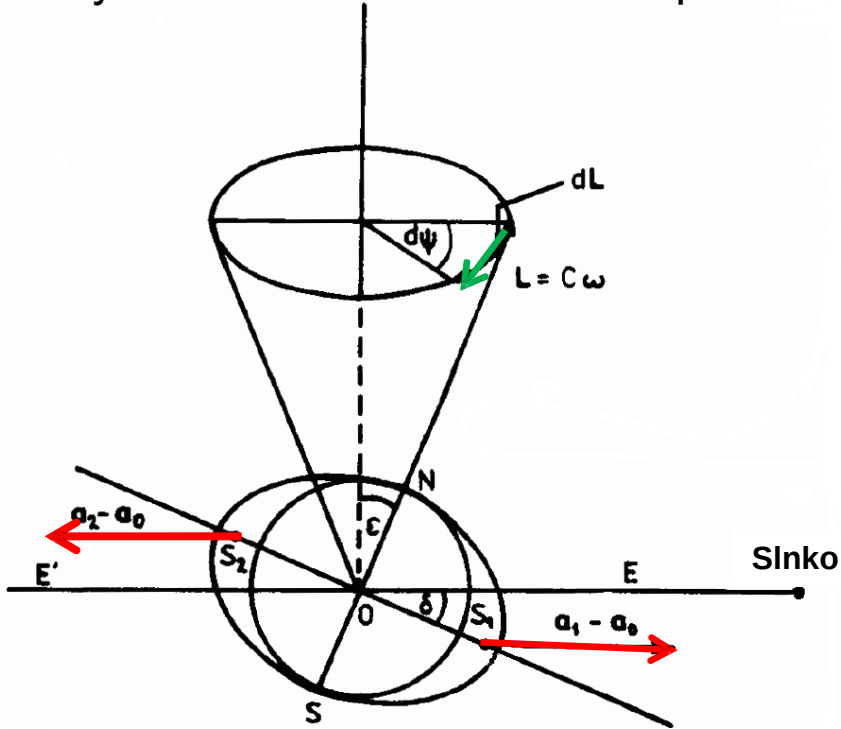
Hipparchos a precesia



Zem sa správa ako obrovský zotrvačník a pod vplyvom „bočných síl“ teda točivých momentov od Mesiaca a Slnka nastáva z mechaniky známy jav precesia osi. Precesiou objavil (a správne vysvetlil) astronóm Hipparchos približne r. 150 pr.n.l., Nutáciu objavil James Bradley r. 1748 (v snahe namerať paralaxu hviezd). Navyše hmotnosť vo vnútri „zemského zotrvačníka“ nie je rozložená rovnomerne, čo vyvoláva ďalšie (nepatrné) pohyby osi. HIPPARCHOS porovnával svoje pozorovania polôh hviezd s pozorovaniami, ktoré sa robili dávno pred ním. Zistil, že sa zmenili dĺžky hviezd. Toto zväčšenie bolo spôsobené tým, že sa posúva základný bod, od ktorého sa dĺžky odrátajú, jarný bod. Tento jav bol nazvaný precesiou jarného bodu.

Newton a precesia

Precesiu vysvetlil z gravitačnej teórie Issak NEWTON. Ukázal, že precesia je dôsledkom rušiacich síl, ktoré pochádzajú od Slnka a Mesiaca a pôsobia na hmotnú vydutinu na rovníku. Nutnou podmienkou precesie je sploštenie zemského sféroidu.



Rušiace teleso spôsobuje v bodoch S_1 , O , S_2 zrýchlenia a_1 , a_0 , a_2 , takže vo výdutiach vznikne relatívne zrýchlenie $(a_1 - a_0)$ v bode S_1 a $(a_2 - a_0)$ v bode S_2 .

Točivý moment tejto dvojice síl je kolmý na rovinu určenú osou rotácie a normálou ekliptiky (smeruje k nám).

Precesnú rýchlosť dostaneme z momentovej vety tuhého telesa

$$T = dL/dt$$

Podľa obrázka zmena momentu hybnosti Zeme je $dL = -L \sin \varepsilon d\psi_\varsigma$ kde $L=C\omega$.



Účinky precesie

- ▶ V dôsledku precesie už nesúhlasia znamenia zverokruhu s príslušnými súhvezdiami na oblohe; posun v ekliptikálnej dĺžke narástol už na takmer 30° .
- ▶ Os rotácie musí opisovať **plášť kužela, ktorého otvor** je daný sklonom voľnej osi (rotačnej osi) k rovine dráhy rušiaceho telesa t.j. $2\varepsilon = 2 \times 23^\circ 27' \approx 47^\circ$.
- ▶ Ako pri slapoch, tak aj pri precesii je vplyv Mesiaca asi dvojnásobný v porovnaní s vplyvom Slnka. (Účinky oboch javov sú totiž úmerné GM/r^3)

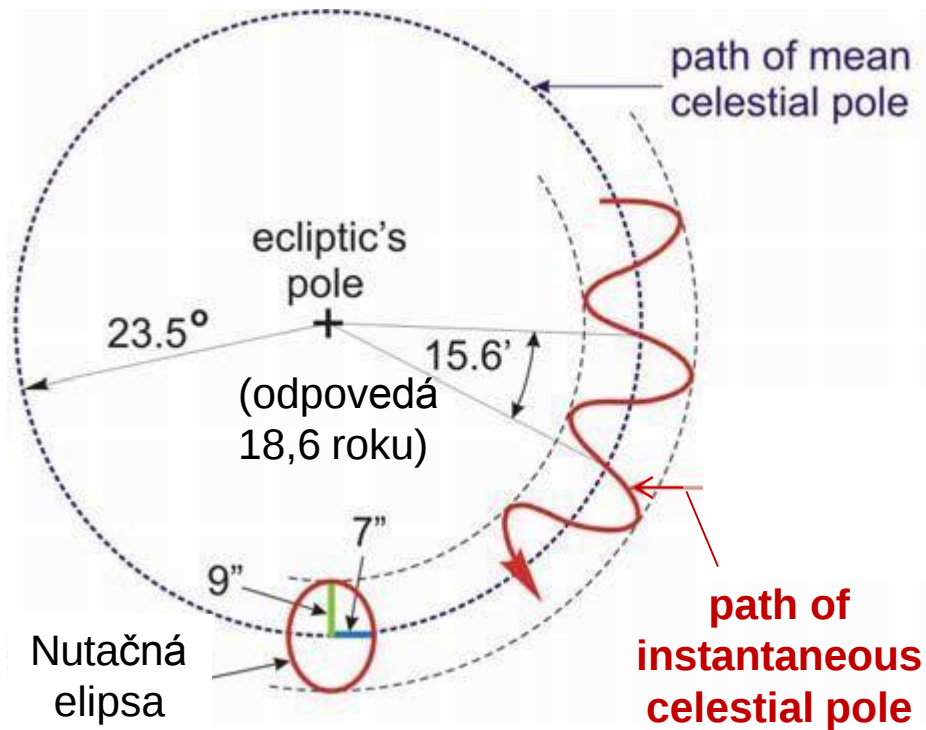




Nutácia Zeme



Nutácia



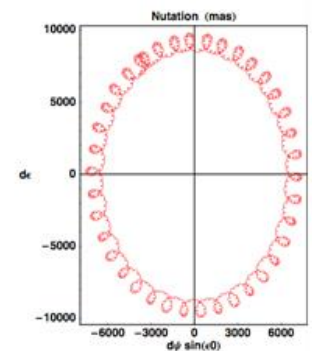
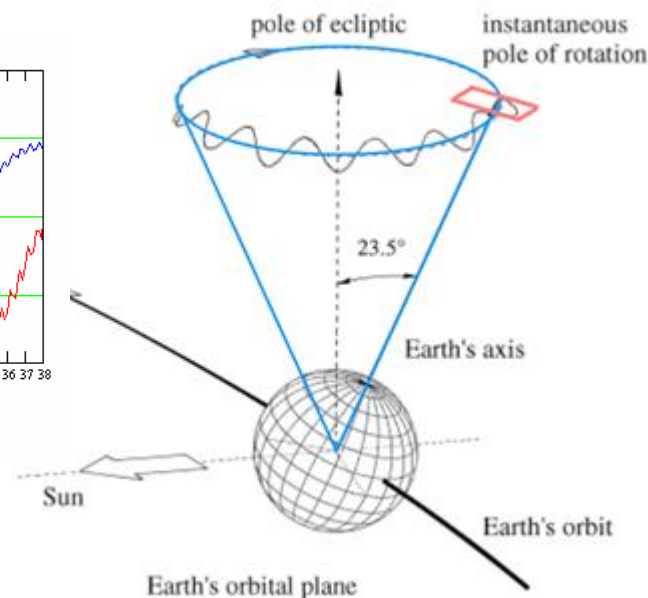
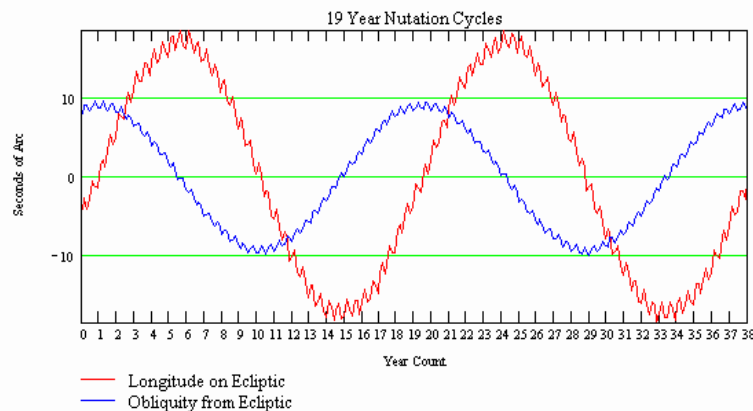
Okrem precesného pohybu rotačnej osi vznikajú ešte krátkoperiodické pohyby. Najväčší člen pochádza od stáčania uzlovej priamky dráhy Mesiaca (priesečník jeho dráhy s ekliptikou), ktorého perióda je 18,6 roka.

Spôsobuje to pohyb rotačnej osi Zeme, ktorý sa nazýva **vynútená nutácia**, alebo len **nutácia**. V dôsledku nutácie opisuje os rotácie ešte nutačnú elipsu s polosami $a = 9,22''$, $b = 6,87''$, pričom veľká polos smeruje k pólu ekliptiky.

Regresný pohyb uzlovej priamky dráhy mesiaca s periódou 18,6 roka je spôsobený poruchami pohybu Mesiaca od Slnka. Keďže rovina dráhy Mesiaca zvierá s ekliptikou $5^\circ 8'$, Slnko pôsobí na Mesiac točivým momentom a spôsobuje precesiu jeho dráhy.

Nutácia zemskej osi

Točivé momenty od Mesiaca a Slnka, ktoré „rozkývavajú zotrvačník“ rotujúcej Zeme, menia periodicky svoju **veľkosť** aj **priestorovú orientáciu**. Tým sa **uhlová rýchlosť precesie osi Zeme mení** a dá sa rozložiť na **hlavný dlhoperiodický člen** (lunisolárna precesia s periódou 25770 rokov a **krátkoperiodické členy** (nutácia **N** s oveľa menšou amplitúdou). Na grafe je priebeh **dvoch hlavných členov nutácie** periódy **18,6 roka** (pohyb uzlovej priamky Mesiaca) a periódy **0,5 roka** (vplyv elipticity dráhy Zeme okolo Slnka **$\pm 0,55''$**). Existujú aj ďalšie (podstatne slabšie) nutačné členy (14-denná Mesačná **$\pm 0,098''$**), a iné.



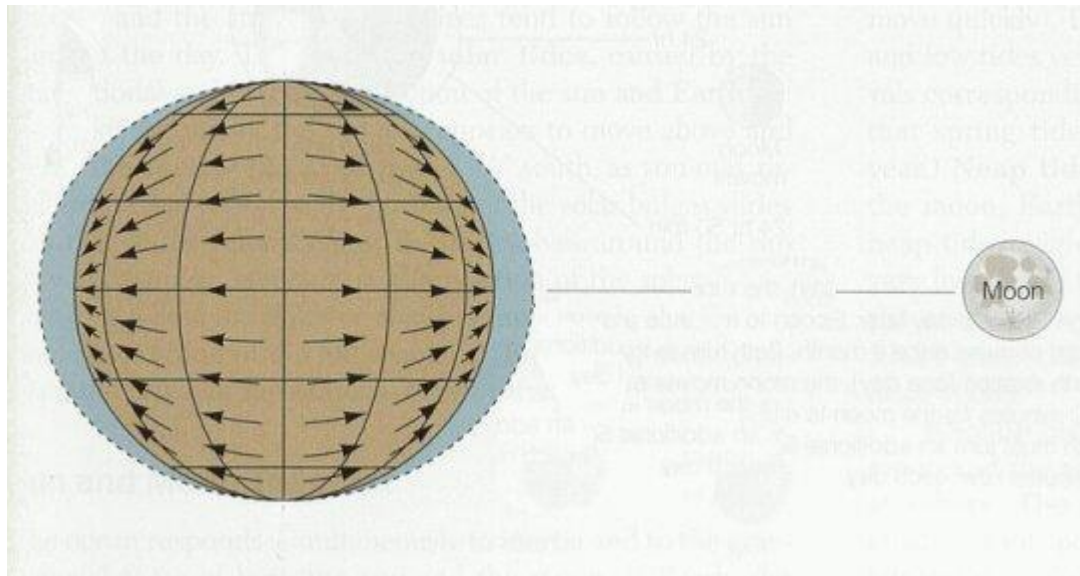


Slapové účinky



Príliv a odliv (high tide, low tide)

- ▶ Zdvíhanie a klesanie hladiny morí, oceánov a povrchu Zeme vplyvom gravitačného pôsobenia Slnka a Mesiaca
- ▶ Vznikajú dve slapové výdute



Slapové javy

- ▶ Zmeny polohy bodov navzájom, teda deformácie nie sú spôsobené samotnou veľkosťou gravitačnej sily Mesiaca, ale rozdielom v prítlačivosti na jednotlivé časti Zeme
- ▶ Mesiac pôsobí prítlačivou silou na **všetky** časti Zeme takmer rovnakou silou, ktorá sa líši len o zlomok percenta v najbližšom a najvzdialenejšom mieste od Mesiaca
- ▶ Tento malý **rozdiel** prítlačivej sily je zodpovedný za slapové javy



Účinok slapových javov

- ▶ Mesiac obieha okolo Zeme tak, že raz za 24 hod. 50 min. sa vráti nad to isté miesto. Za túto dobu nastáva na danom mieste 2-krát príliv a 2-krát odliv.
- ▶ Základná perióda slapov je 12 h. 25 min.
- ▶ Okrem Mesiaca je rušivým telesom aj Slnko, s periódou 12 h. Jeho účinkom sa amplitúda prílivov od Mesiaca zvyšuje (nov, spln) alebo znižuje (v kvadrátúre, to zn. 1. a 3. štvrt')



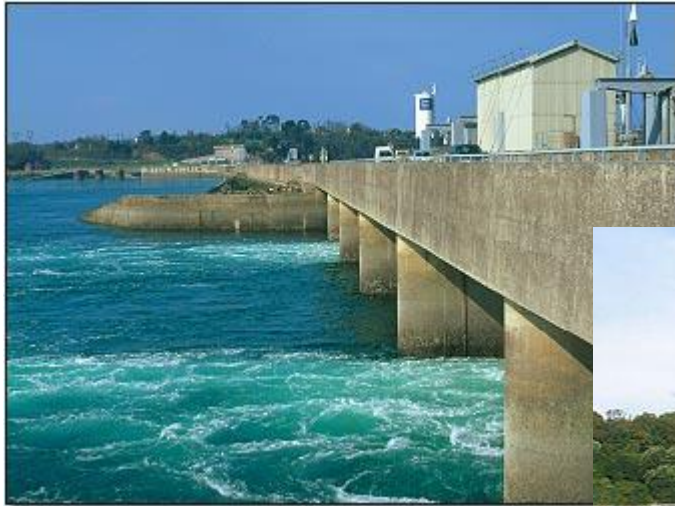
Veľkosť prílivu

- ▶ Je daná geometrickými rozmermi oceánu, hĺbkou a tvarom pobrežia
- ▶ 17 m pri Newfoundland (Kanada)
- ▶ 6 – 13 m pri pobreží Bretónska (Le Mont – Saint Michel)
- ▶ 8 m v kanáli La Manche - nebezpečný pre tankery – uviaznu na podmorských skalách
- ▶ malé vnútorné moria (Kaspické, Čierne) nemajú príliv – celá plocha má rovnaké podmienky
- ▶ Gibraltar – úzky prieliv a nestihne za 6 hodín natiect' voda



Využitie slapov

- ▶ Štyri komerčné elektrárne:
- ▶ La Rance (Bretónsko), 2 v južnej Kórei a 1 v Kanade



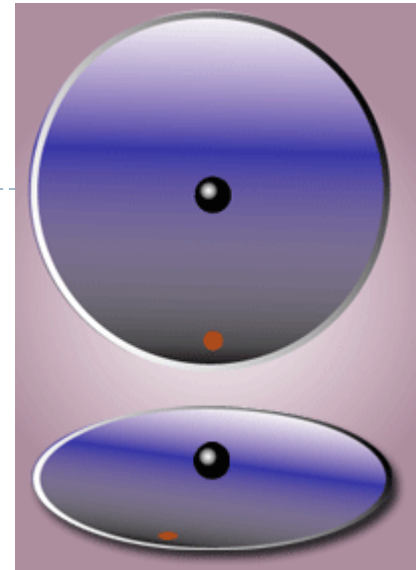
Le Mont Saint-Michel

- ▶ největší příliv v Evropě (nad 15 m)
- ▶ trvá 36 – 48 hodin



Coriolisova sila

- ▶ Je zotrvačná sila pôsobiaca na telesá v rotujúcej neinerciálnej sústave
- ▶ **Coriolisova sila** patrí spolu so zotrvačnou a odstredivou k fiktívnym silám. Prejavuje sa v rotujúcich vzťažných sústavách
- ▶ Coriolisova sila pôsobí iba na telesá, ktoré sa v rotujúcej vzťažnej sústave (ktorá je neinerciálna) pohybujú. Je daná vzťahom $F = -2m\omega \times v$



Pri vypúšťaní vody z plného umývadla sa zvyčajne vytvorí vír, o ktorom sa hovorí, že smer jeho rotácie je určený Coriolisovou silou a že na južnej pologuli voda z umývadla vyteká „opačne“, ale veľkosť Coriolisovej sily je veľmi malá a voda stihne vytečiť dávno pred tým, než by sa jej vplyv mohol merateľne prejavíť

Vzduch okolo každej tlakovej níše na severnej pologuli krúži (nasávaný do stredu tlakovej níše) proti smeru hodinových ručičiek, na južnej pologuli v smere. Podobne pri tlakovej výši (kedy je vzduch vytláčaný z jej stredu) ide na severnej pologuli o pohyb v smere hodinových ručičiek, na južnej pologuli proti tomuto smeru.

