

Orientacija Zemlje ("Earth Orientation")

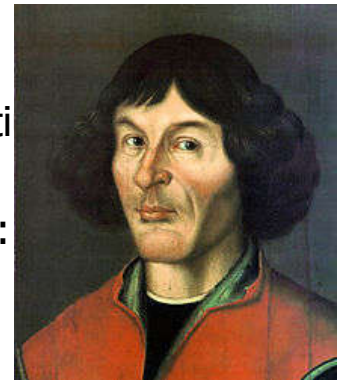
- ❑ Orientacija Zemlje se nanaša na parametre, količine, ki določajo povezavo med terestričnim in nebesnim referenčnim sistemom (ITRS in ICRS). Parametri Zemljine orientacije določajo:
 - usmeritev Zemljine rotacijske osi v prostoru;
 - njen položaj glede na Zemljino telo;
 - in trenutno hitrost ("rate") rotacije.

Zemljina gibanja

- ❑ Zemlja se hkrati giblje na štiri načine:
 - ❑ giblje se, skupaj z našo galaksijo, glede na druge galaksije,
 - ❑ kroži s Osončjem znotraj naše galaksije,
 - ❑ kroži, skupaj s planeti Osončja okoli Sonca → revolucija,
 - ❑ vrti se okoli svoje trenutne vrtilne osi → rotacija.
- ❑ Za satelitsko geodezijo sta pomembni zadnji dve gibanji.
- ❑ Zanimivo pri tem je, da pri pojasnitvi ta dva Zemljina gibanja izhajamo iz dveh različnih fizikalnih zasnov. Revolucijo pojasnjujemo z gibanjem masne točke v gravitacijskem polju, dočim rotacijo Zemlje pojasnjujemo z vrtenjem togega telesa oz. vrtavke.

Rotacija Zemlje

- Vrtenje Zemlje je dokončno utemeljil Nikolaj Kopernik leta 1543 v svojem delu "De revolutionibus orbium celestium" in s tem dokončno utrdil heliocentrično zgradbo Osončja.
- Dokaze za dnevno vrtenje Zemlje najdemo v naslednjem:
 - odklon telesa pri prostem padu (Coriolisov učinek),
 - Foucaultovo nihalo.



- Odklon telesa pri prostem padu je prvi pojasnil Newton, praktično so ga dokazali v XIX. stoletju.
- Telo, ki se nahaja zelo visoko nad Zemljo, ima večjo obodno hitrost kakor točka na zemeljskem površju navpično pod njim, ker je bolj oddaljeno od središča vrtenja. Zato med padanjem, ne le da ne bo zaostalo za vrtenjem Zemlje, temveč jo bo prehitelo in padlo vzhodno od točke navpično pod seboj.

Rotacija Zemlje – dokaz 1

- Točka na površju Zemlje kroži z obodno hitrostjo $v_1 = \omega R_Z$, telo na višini h pa z obodno hitrostjo $v_2 = \omega(R_Z + h)$. Razlika hitrosti je $v_2 - v_1 = \omega h$. Čas padanja dobimo iz:

$$h = 0 + \frac{1}{2}gt^2, \quad t = \sqrt{\frac{2h}{g}}$$

Zaradi večje hitrosti v_2 se bo telo odklonilo proti vzhodu za vrednost δx :

$$\delta x = (v_2 - v_1)t = \omega h \sqrt{\frac{2h}{g}} = \omega \sqrt{\frac{2h^3}{g}}$$

- Odklon je sorazmeren z višino s katere telo pada in odvisen od geografske širine kraja, kjer se padec dogaja. Vpliv širine se spreminja z vrednostjo $\cos\phi$, torej je največji na ekvatorju.
- Pri višini $h = 30$ m je odklon na ekvatorju $\delta x = 5,4$ mm

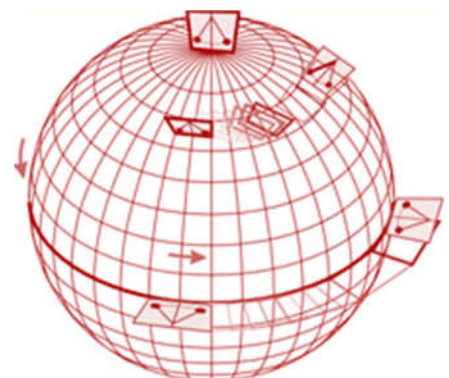
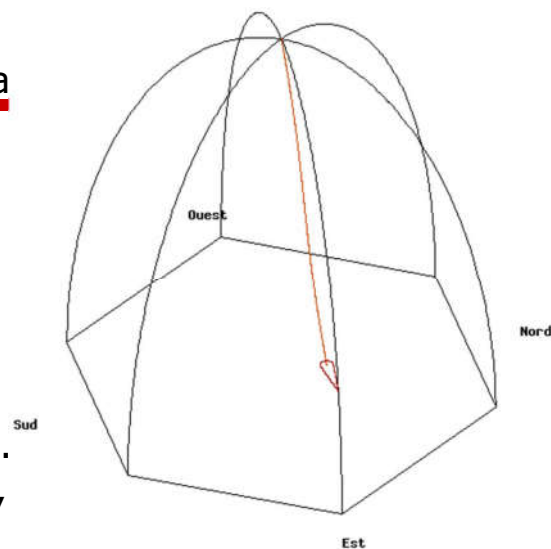
Foucaultovo nihalo



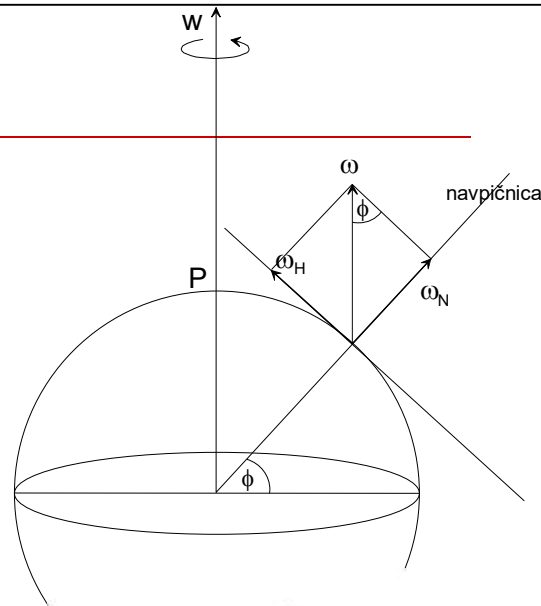
- ❑ Leta 1851 je francoski fizik Jean Leon Foucault v pariškem Panteonu izvedel poskus, da bi dokazal vrtenje Zemlje.
- ❑ Nihalo, ki se imenuje po njem, je zelo dolgo nitno nihalo z dolgim nihajnim časom (nihalo je tvorila krogla težko 28 kg, klavirska struna dolžine 67 m, premera 1,4 mm).



- ❑ Nihalo niha z dolgimi nihaji.
- ❑ Zaradi vrtenja Zemlje se ravnina nihanja navidezno (glede na zemeljska tla) vrti okoli navpičnice v smeri urinega kazalca s kotno hitrostjo $\omega_N = \omega \sin \phi$, ($\omega = 7,292115 \cdot 10^{-5} \text{ 1/s}$, kotna hitrost rotacije Zemlje $\omega = 2\pi/T$, $T = 86164,1 \text{ s}$).
- ❑ To nihanje je najbolj očitno če ga obravnavamo na severnem polu, $\phi = 90^\circ$. Nihajna ravnina nihala je ves čas enaka, toda Zemlja se pod nihalom vrti s kotno hitrostjo ω (v obratni smeri urinega kazalca), zato opazovalec na tleh vidi, da se nihajna ravnina nihala vrti v smeri urinega kazalca s kotno hitrostjo ω . Na ekvatorju se nihajna ravnina ne vrti glede na zemeljska tla.
- ❑ Animacije!

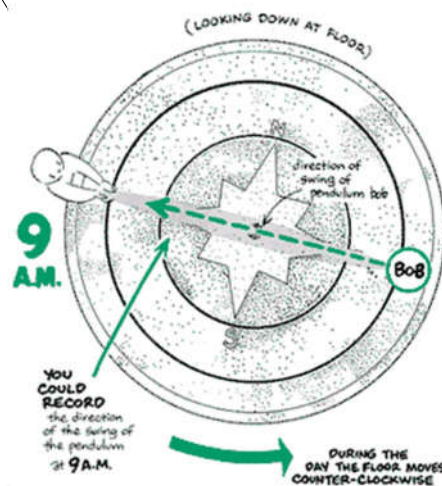


- Za tla na vmesnih geografskih širinah, razstavimo vektor kotne hitrosti ω vrtenja Zemlje na **navpično komponento $\omega_N = \omega \sin \phi$** , pravokotno na tla in horizontalno komponento $\omega_H = \omega \cos \phi$ v smeri Zemljine vrtilne osi (vrtenje okoli meridiana). To je hitrost s katero se nebesni svod nad nami pomika od vzhoda proti zahodu. Za Foucaultovo nihalo je pomembna navpična komponenta kotne hitrosti. S to hitrostjo se se namreč tla na geografski širini ϕ vrtijo okrog navpične osi v obratni smeri urinega kazalca (velja za severno poloblo).



- V eni uri znaša odklon ravnine nihala $15^\circ \sin \phi$, torej za poljubno število ur $\omega_N = 15^\circ t^{ur} \sin \phi$.
- Na polu ima nihalo periodo 24 ur. Perioda rotacija na vmesnih širinah znaša:

$$T_{rot} = \frac{24^h}{\sin \phi}$$



Revolucija Zemlje

- Planeti in Zemlja se gibljejo okrog Sonca kot posledica Newtonovega zakona gravitacije. Zaradi velikih razdalj med planeti in Soncem, obravnavamo te kot masne točke. Planetno gibanje je podvrženo določenim zakonitostima. Te je odkril J. Kepler in jih podal v obliki strogih matematičnih obrazcev. Keplerjevi zakoni:
 1. **Središča planetov se gibljejo okrog Sonca po elipsah; v skupnem gorišču teh elips je Sonce.**
 2. **Veznica med središčem Sonca in središčem planeta popiše v enakih časovnih presledkih enake ploščine** → zakon o konstantni ploščinski hitrosti.
 3. **Kvadrati obhodnih dob T posameznih planetov so v istem razmerju kakor tretje potence velikih polosov a , njihovih eliptičnih tirov**; drugače: kvocient $\frac{T^2}{a^3} = konst$ je isto število za vse planete (zakon prikazan v uproščeni obliki).
- Prva dva zakona je Kepler objavil leta 1609 v Pragi v knjigi "Astronomia nova de motibus stellae Martis". Tretji zakon pa je bil objavljen v knjigi "Harmonices mundi" leta 1619 v Linzu (napisano leta 1618).



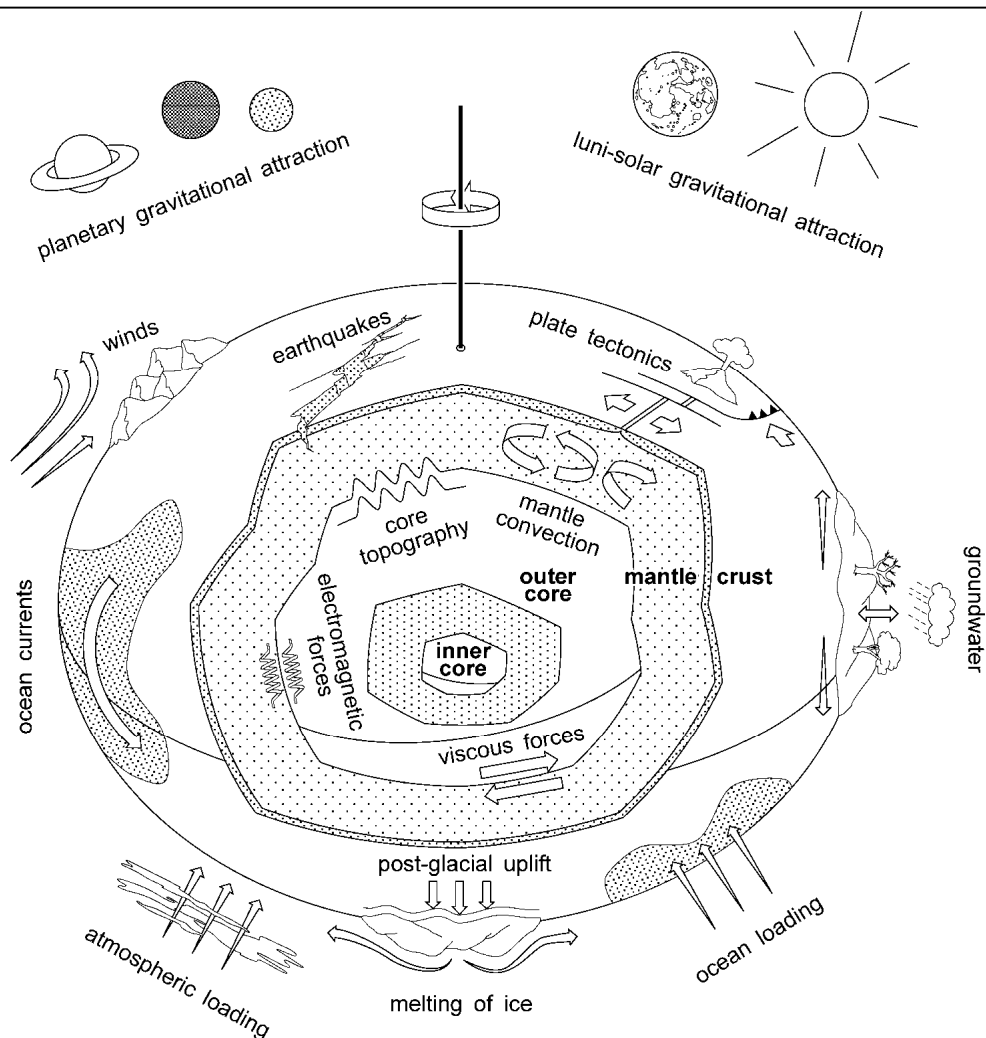
Tretji Keplerjev zakon

- Kepler sam ni razumel zakaj njegovi zakoni veljajo. Šele Newton je izpeljal zakon, ki povzroča planetno gibanje skladno z zakoni. Newton je uvidel, da je njegov tretji zakon (1687) v zvezi s tretjim Keplerjevim zakonom v obliki:

$$\frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{G(M+m)} = konst \quad n^2 a^3 = G(M+m)$$

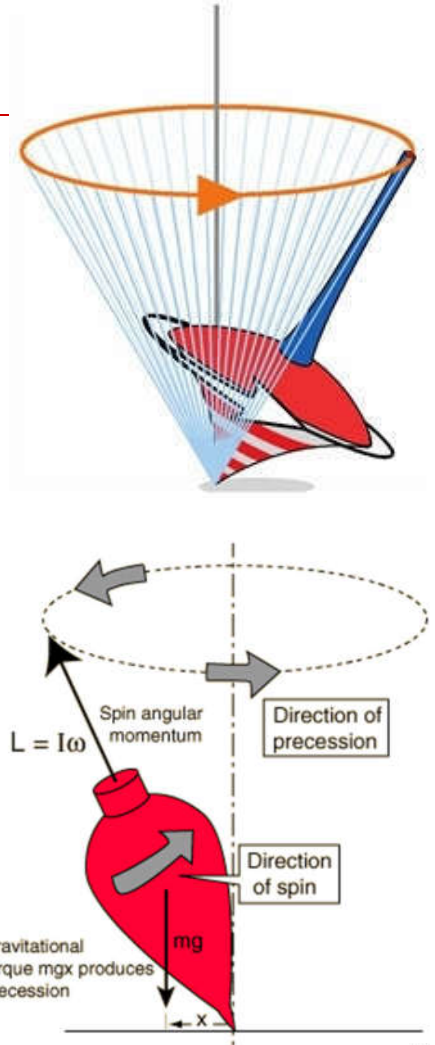
- Kjer so T siderična perioda planetov, a velika polos tirov, G je univerzalna gravitacijska konstanta, M in m sta masi središčnega telesa in telesa, ki kroži.
- V primeru Osončja se masa planetov, razen pri največjih, lahko zanemari. Konstanta pri planetih Osončja znaša $2,97 \cdot 10^{-19} \text{ [s}^2/\text{m}^3\text{]}$;
enote: obhodna doba v [sek], velika polos v [m].
- Če obhodno dobo izrazimo v letih, veliko polos v [a.e.], $\left(\frac{1 \text{ leto}}{T}\right)^2 \left(\frac{a}{1 \text{ AU}}\right)^3 = 1$ velja za Osončje: $M = M_{\odot}$ in zakon dobi zelo enostavno obliko (kot jo je izpeljal Kepler):
pri tem smo člen $2\pi/T$ zamenjali z n (povprečno kotno hitrostjo).
- Konstanta v zakonu ima lahko drugačno vrednost pri drugih planetnih sistemih (na primer Jupitrove lune).

Rotacija Zemlje - vplivi

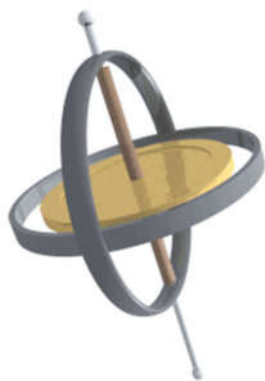


Posebnosti Zemljine rotacije

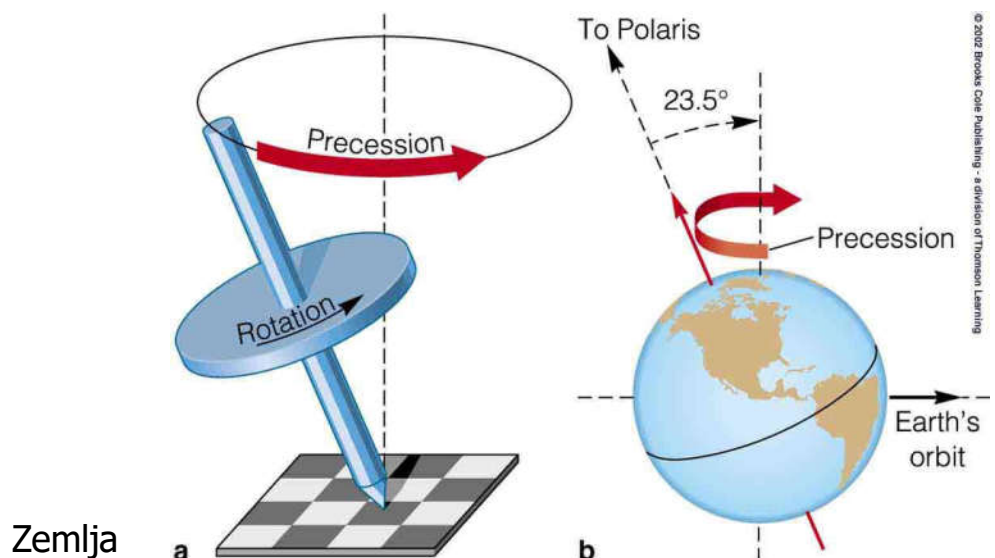
- Nepravilnosti Zemljine rotacije pojasnujemo z gibanjem vrtavke. Spomnimo se: vrtavka je rotacijsko simetrično telo z zelo velikim vztrajnostnim momentom. Velik vztrajnostni moment pomeni, da dobi telo pri danem navoru zunanjih sil majhen kotni pospešek.
- Vztrajnostni moment telesa (J) je merilo za vztrajnost telesa proti spremembi kotne hitrosti vrtenja.
- Vrtenje vrtavke je v splošnem precej zapleteno. Poleg tega, da se vrti okoli lastne osi, njena os tudi "precesira". Pri stalnem kotu θ se suče okrog navpičnice po plašču stožca.
- Možno je tudi, da se med precesiranjem izmenično spreminja kot θ , tako da vrtavkina os niha gor in dol.



Precesija vrtavke



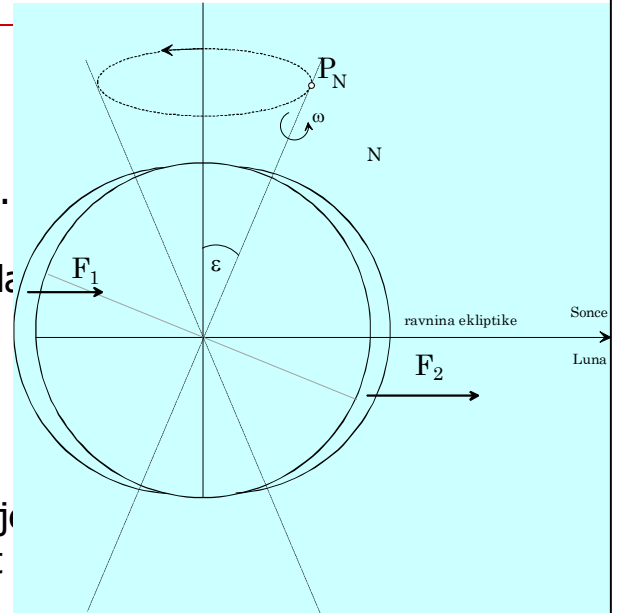
vrtavka



Zemlja

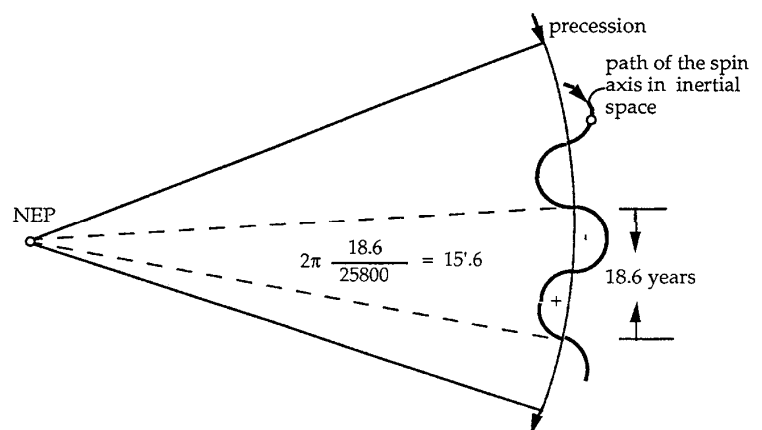
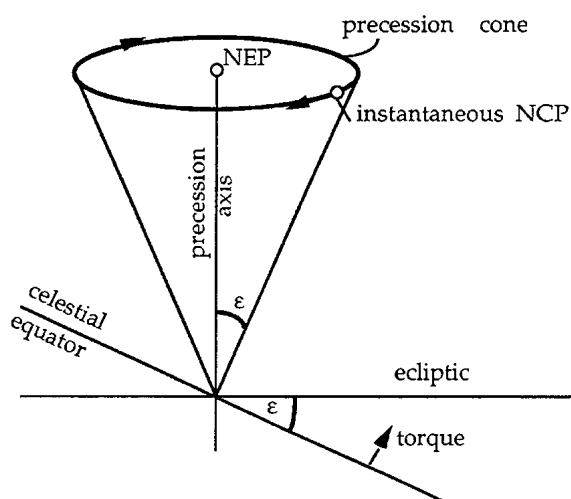
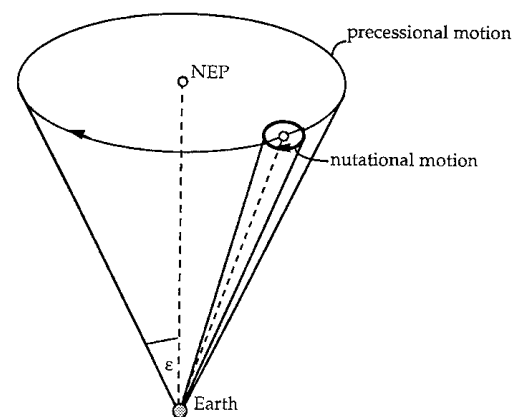
Precesijsko gibanje Zemlje

- Zemlja zaradi dnevnega vrtenja ima vrtilno količino. Nanjo učinkujeta gravitacijski sili Lune in Sonca. Če bi Zemlja bila popolna krogla, bi bil navor privlačnih sil nič in smer vrtilne količine (sovpada z rotacijsko osjo) bi bil stalen.
- Zaradi sploščenosti in prisotnosti ekvatorskih izboklin ter nagnjenosti vrtilne osi, nastane precesijsko gibanje Zemljine rotacijske osi.
- Sonca in Luna učinkujeta na odebljeni del Zemlje s privlačno silo, ki je večja za bližnji del (F_2) kot za oddaljeni del (F_1): $F_1 < F_2$. Navor teh sil je različen od nič in stalno učinkuje na Zemljino rotacijo, ter povzroča precesijo.
- Posledično Zemljina rotacijska os precesira v prostoru.
- Zaradi sprememb v medsebojni legi Sonca, Lune in Zemlje, je precesijsko gibanje rotacijske osi še bolj zapleteno → **nutacija**.



Precesija in nutacija

- Ker je Luna štiristokrat bližja od Sonca, znaša njen vpliv 2/3 celotnega. **Nutacija predstavlja periodične motnje precesije**. Nastaja zaradi periodičnih sprememb v privlačnih silah Lune in Sonca. Največji učinek povzroča obratno gibanje vozlov Luninega tira v ravnini ekliptike. Perioda tega člena je 18,6 let z amplitudo 9".

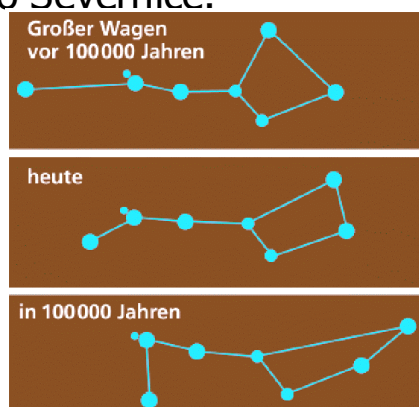


Precesijska perioda

- Celotno precesijsko gibanje Zemljine rot. osi lahko razčlenimo na:
 - lunisolarno precesijo,
 - planetno precesijo,
 - nutacijo.
- **Lunisolarna precesija** povzroča gibanje nebesnega pola okrog ekliptičnega pola po plašču stožca. Ker spreminja Zemljina os svojo smer, spreminja lego v prostoru tudi ravnina nebesnega ekvatorja tako, da ostane kot med njo in ravnino ekliptike stalen. Posledica je, da ekvator počasi drsi po ekliptiki oz. pomladišče Υ se premika vzdolž ekliptike v nasprotni smeri, kot poteka navidezno letno gibanje Sonca po ekliptiki, za vrednost $\psi=50,3''$. Polni obhod po precesijskem krogu opravi pol v času $360^\circ/\psi$, kar znaša približno 25 756 let ($\sim 26\ 000$ let \rightarrow Platonsko leto).
- **Planetna precesija** povzroča počasno spremembo naklona ekliptike, ta se giblje med 22° in $24,5^\circ$ s skoraj 40 000 letno periodo.

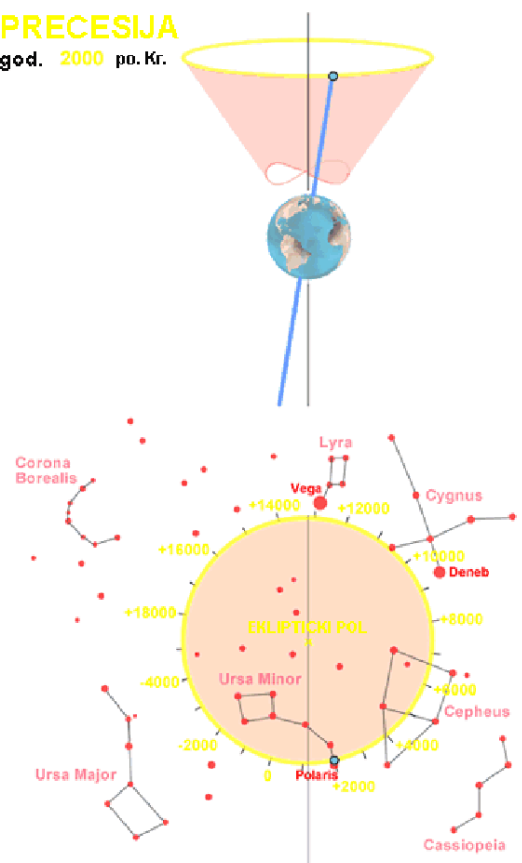
Posledice precesije

- Pri svojem gibanju se pomladišče premika iz enega v drugo zoodikalno ozvezdje. Ko so odkrili pomladišče (stari Grki) se je to nahajalo v ozvezdju Ovna. Do danes se je pomladišče premaknilo v ozvezdje Rib, oznaka pa je ostala stara.
- Zaradi precesije se nebesni pol premika med zvezdami. V različnih časih igrajo različne zvezde vlogo Severnice. Čez 12 000 let bo to zvezda Vega (α Lyr).



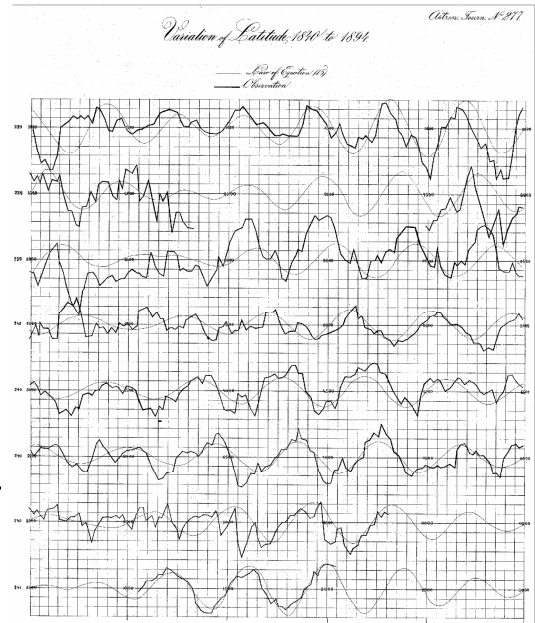
PRECESIJA

god. 2000 po. Kr.



Premikanje Zemljinih polov (1)

- Zaradi neenakomerne razporeditve mas in nehomogene razporeditve gostote v njeni notranjosti prihaja do sprememb položaja trenutne vrtilne osi. Ker tonejo celine v plastično Zemljino skorjo, prihaja do sprememb Zemljinih vztrajnostnih momentov. Posledično skorja drsi po jedru in zdi se, da vrtilna os prebada skorjo v vsakem trenutku v drugi točki oz. da pola "potujeta" po Zemlji.
- To je pojav t.i. **premikanja (gibanja) polov** ("polar motion").
- Pojav so odkrili v XIX. st. ko so poskušali pojasniti periodično spreminjanje astron. geografskih širin v različnih observatorijih. Pojav prvi ugotovil nemški astronom K.F. Kustner leta 1887.
- Pet let kasneje je teorijo potrdil ameriški astronom S.C. Chandler.
- Za spremljanje pojava ustanovili ILS "Internatioior Latitude Service" → IPMS "Int. Polar Motion Service" → skupaj z BiH → IERS.

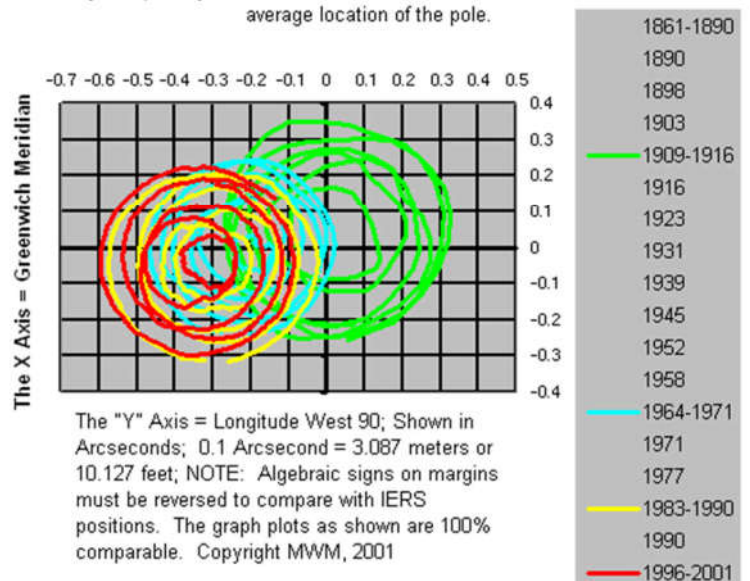


Premikanje Zemljinih polov (2)

- Premikanje je približno krožno z dvema periodama:
 - 14-mesečna, ki se imenuje Chandlerjeva perioda,
 - druga 300-dnevna Eulerjeva perioda.
- Razliko lahko pojasnimo z elastičnimi lastnostmi Zemljinega telesa.

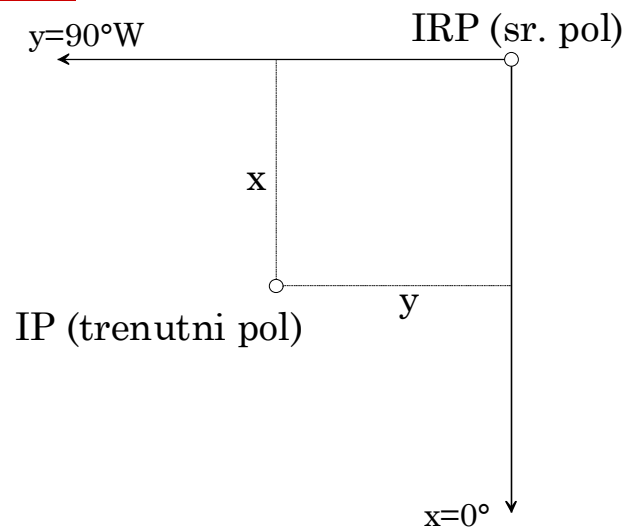
Polar Motion 1909 - 2001

The track made by the location of the North Spin Axis through the 6.5 year spirals of Chandler's Wobble. Each color shows one 6.5 year spiral cycle. The shift towards the left shows the drift of the average location of the pole.



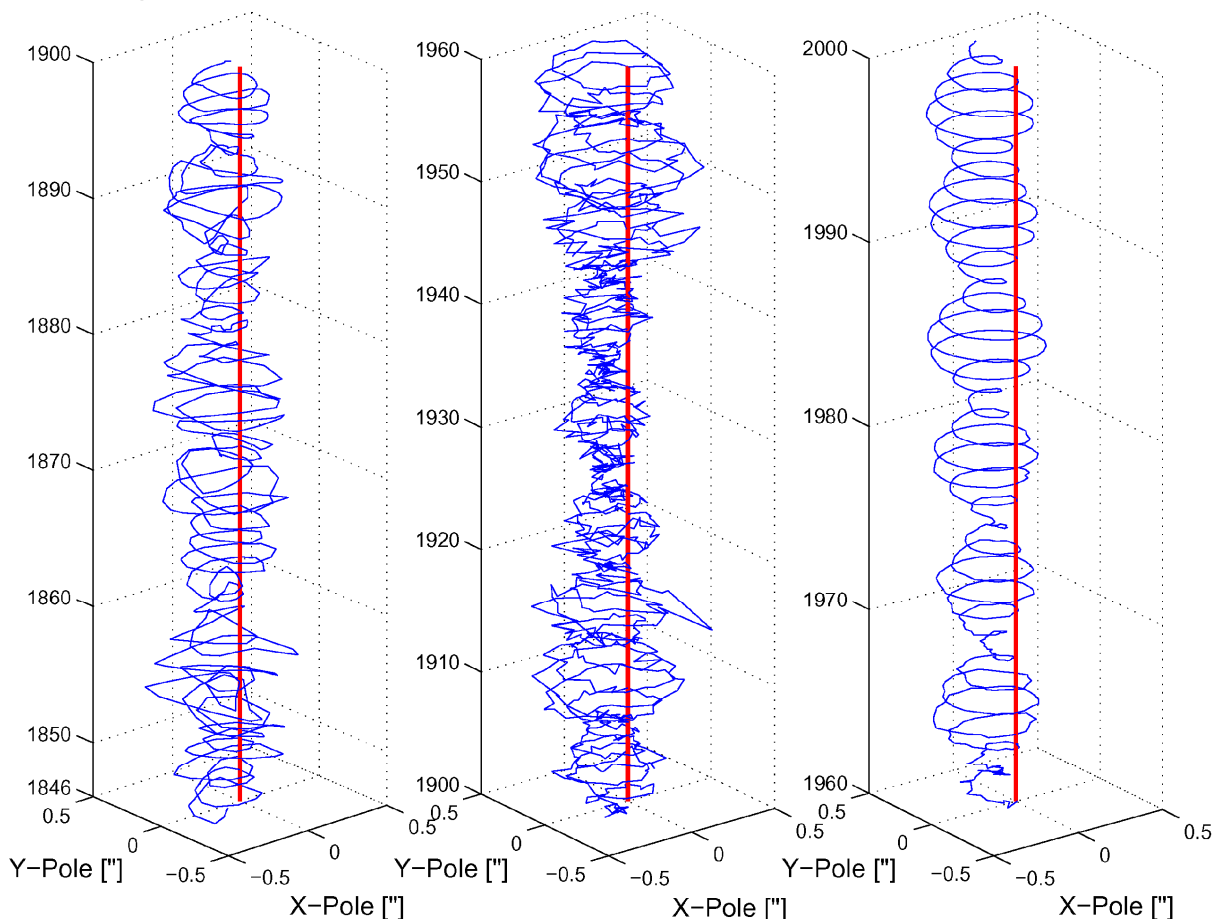
Premikanje Zemljinih polov (3)

- Položaj trenutnega pola glede na srednji pol je podan s pravokotnima koordinatoma x_P , y_P , definiranim v tangentski ravnini srednjega pola. X-os je v smeri Greenviškega meridiana, y-os v smeri meridiana $\lambda=90^\circ\text{W}$.
- IRP (IERS Reference Pole) – srednji pol.
- Položaj srednjega pola je bil določen na osnovi podatkov služb, od ILS do IERS.
- Natančnost določitve $0,002''$.



Premikanje polov v zadnjih sto let

Very old, 1846–1900 Optical, 1900–1960 VLBI/SLR/GPS, 1960–2000



Parametri Zemljine orientacije (EOP – "Earth Orientation Parameters")

- Parametri Zemljine orientacije določajo:
 - usmeritev Zemljine rotacijske osi v prostoru;
 - njen položaj na Zemlji;
 - in trenutno hitrost ("rate") rotacije.
- Načeloma bi se orientacija Zemlje lahko predstavila samo z tremi rotacijskimi koti, vendar je iz zgodovinskih in praktičnih razlogov količin EOP pet.

Parametri Zemljine orientacije (EOP – "Earth Orientation Parameters")

- Parametri orientacije Zemlje predstavljajo rotacijo med vrtečim se geocentričnim terestričnim koordinatnim sistemom ITRS (materializiranim z koordinatami opazovalnih postaj na Zemeljskem površju) in nevrtečim se geocentričnim nebesnim koordinatnim sistemom ICRS (materializiranim z koordinatami nebesnih teles, zvezd, kvazarjev itd.).
- Sama rotacija med koordinatnima sistemoma je podana z ustrezno skupno rotacijsko matriko med krajevnim vektorjem v nebesnem k.s. (r_{neb}) in krajevnim vektorjem v terestričnem k.s. (r_{ter}):

$$r_{\text{neb.}}(t) = \mathbf{R}(t) r_{\text{ter.}}(t) \quad t_{TT} = \frac{JD_{TT} - T_0}{36525}, \quad T_0 = 2451545,0TT$$

- T_0 je Julijanski datum 1. Januarja 2000 ob 12 uri (epoha J2000,0).

Rotacija ICRS ↔ ITRS

$$\mathbf{R}(t) = \mathbf{P}(t) \cdot \mathbf{N}(\Delta\varepsilon(t), \Delta\psi(t)) \cdot \mathbf{R}_3(s(t)) \cdot \mathbf{R}_1(y(t)) \cdot \mathbf{R}_2(x(t))$$

- ❑ kjer so:
- ❑ $\mathbf{P}(t)$: precesijska matrika;
- ❑ $\mathbf{N}(t)$: nutacijska matrika, nutacija v naklonu $\Delta\varepsilon$, nutacija v astronomski dolžini $\Delta\psi$;
- ❑ $\mathbf{R}_3(s)$: matrika zvezdnega časa s (funkcija časovnih skal UT1 in UTC);
- ❑ $\mathbf{R}_1(y) \mathbf{R}_2(x)$: matrika elementov gibanja polov; koordinate trenutnega pola y, x .

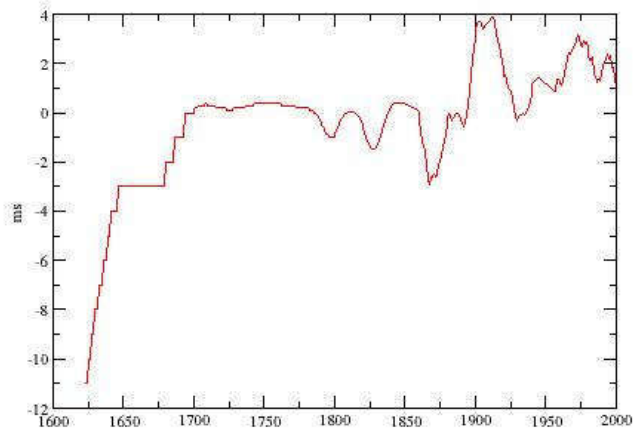
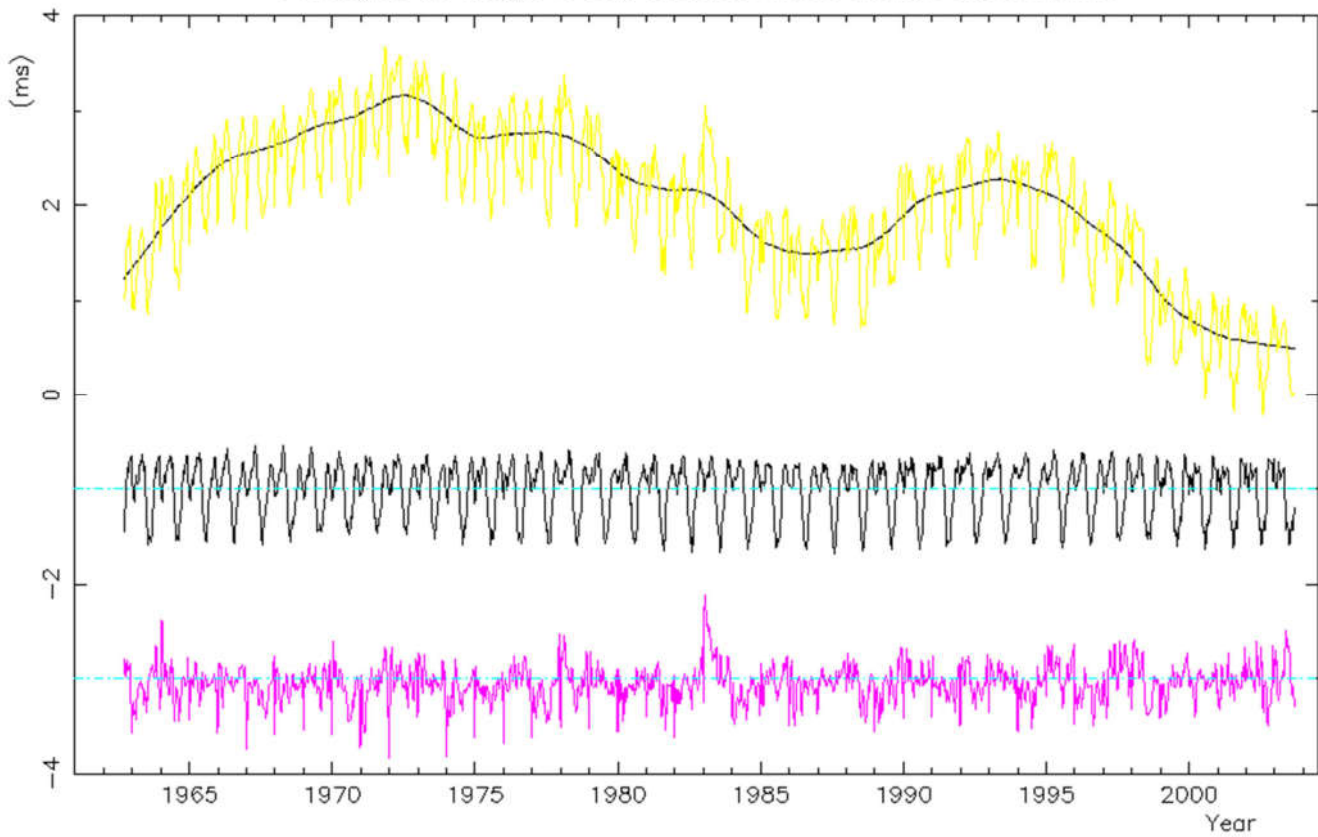
- ❑ Rotacija med nebesnim in terestričnim sistemom je razčlenjena na tri komponente, čeprav je samih parametrov Zemljine orientacije pet.
- ❑ Pet parametrov orientacije Zemlje (EOP) so izpeljani na osnovi opazovanj, določajo popravke enakomerni dnevni rotaciji Zemlje in modeliranemu gibanju nebesnega pola (precesija, nutacija). Parametri so:

Parametri EOP

- ❑ **Kratkoperiodični nutacijski členi $\Delta\varepsilon$, in $\Delta\psi$** (nutacija v astronomski dolžini in nutacija v naklonu); člena podajata položaj trenutnega nebesnega pola glede na modelirani položaj nebesnega pola (skladno z ustrežno teorijo precesije - nutacije). CIP "Celestial Intermediate Pole", oz. trenutni položaj rotacijske osi Zemlje na nebesni krogli. CIP se giblje po nebesni krogli skladno z ustrežno teorijo precesije-nutacije.
- ❑ **Pravokotni koordinati (y, x)** trenutnega Zemljinega pola glede na IERS srednji pol.
- ❑ spremembe v hitrosti Zemljine rotacije se odražajo spremembah svetovnega časa UT1. Te so prikazane skozi spremembe v dolžini dneva – "length-of-day", **LOD**. Odstopanje trajanja enega vrteža Zemlje od 86400 SI-sekund imenujemo "presežek, ostanek" dolžine dneva, (**LOD**).
- ❑ Zveza med Zemljino kotno hitrostjo ω in količino LOD je:
$$\omega = \Omega^N \left(1 - \frac{LOD}{T}\right)$$
 pri čemer je $\Omega^N = 72\,921\,151,467064$ 10-12 radian/s; nominalna kotna hitrost Zemljine rotacije (ustreza hitrosti rotacije Zemlje iz leta 1820). T je trajanje srednjega sončevega dneva.
- ❑ Negotovost določitve komponent EOP znaša trenutno (leto 2015) nekaj deset μs (microarcsecond) za položaj terestričnega in nebesnega pola, ter nekaj μs za svetovni čas.

Spremembe dolžine dneva

Filtering of the Length of Day: trend, seasonal variation and residuals

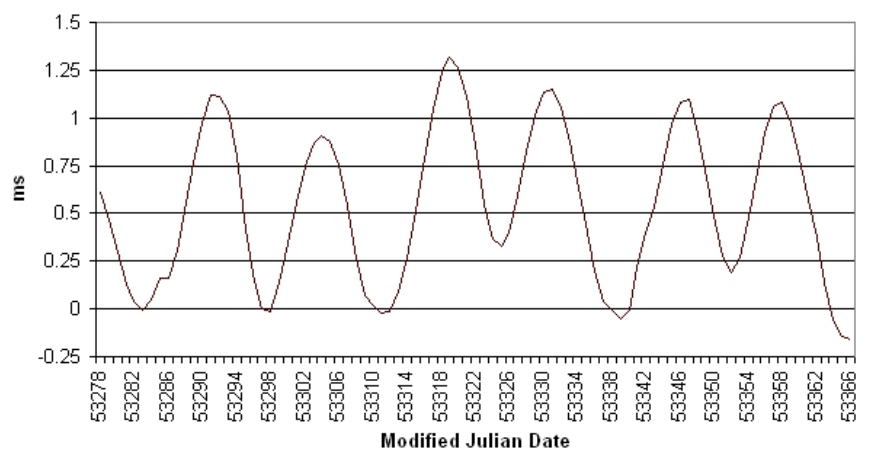


LOD med leti 1623 in 2000

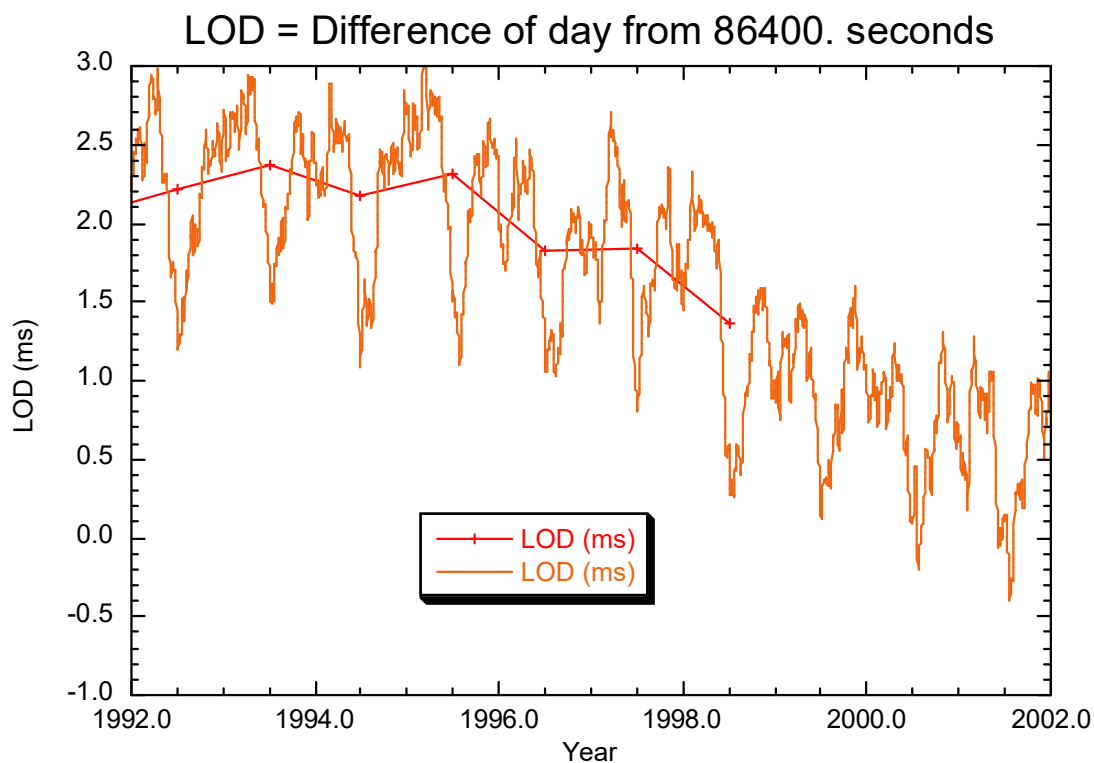
LOD leta 2004



Length of Day - 86400 s



LOD v zadnjih letih



LOD

