

# Fyzika Zeme

Prednáška pre poslucháčov geológie  
bakalárskeho štúdia

**Adriena Ondrášková**

1. – **Určovanie veku hornín**
- 2.- 3. – **Seizmológia (zemetrasenia a šírenie vln Zemou)**
- 4.- 6. – **Tvar Zeme a slapy**
7. – **Termika (zdroje tepla, teplota a tepelná história)**
- 8.- 9. – **Magnetické pole Zeme**
10. – **Rotácia Zeme**
- 11.-12.– **Ionosféra a magnetosféra**

# Prednáška č. 10 – rotácia a pohyby Zeme)

## 1. Základné pohyby Zeme

### a) Obeh okolo Slnka a rotácia

## 2. Zmeny rotácie

### a) Zmeny polohy rotačnej osi

– vzhľadom na hviezdy

– precesia rotačnej osi Zeme

– nutácia rotačnej osi Zeme

### b) – vzhľadom na Zem samotnú

– voľná nutácia rotačnej osi Zeme

### c) Zmeny rýchlosti rotácie

## 2. Zmeny dráhových parametrov Zeme

*a ich dôsledky*

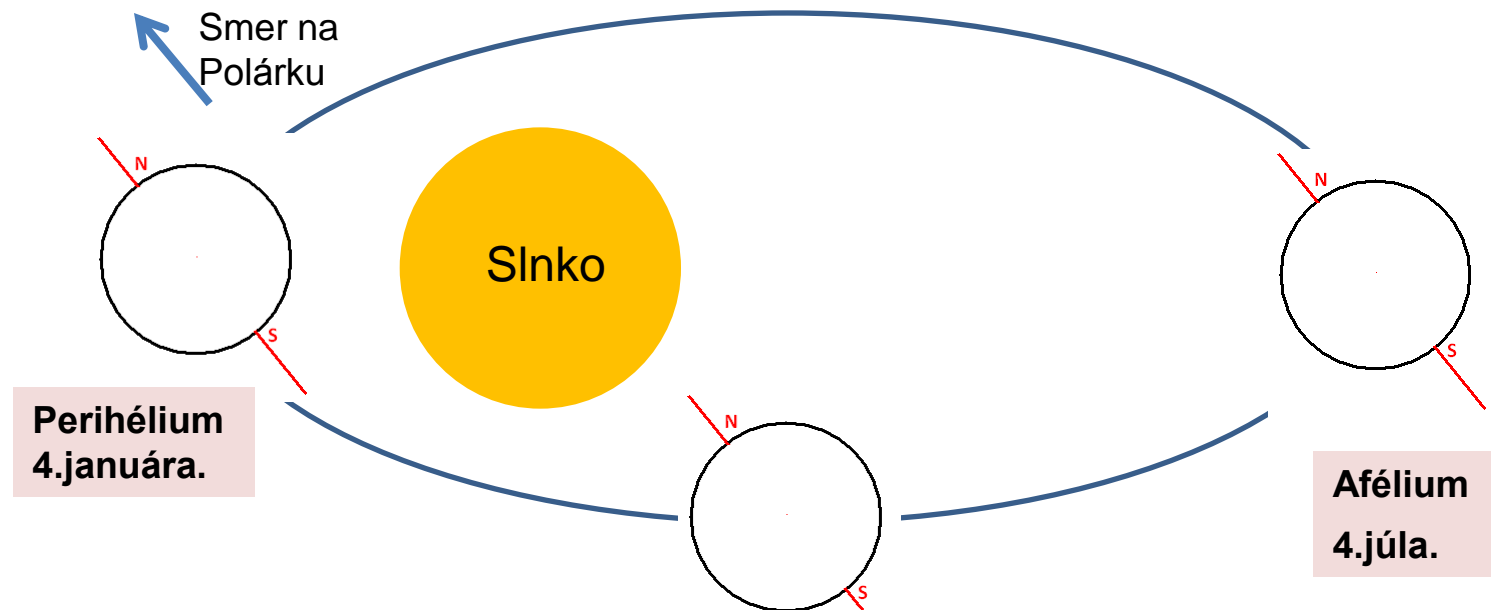
### a) Zmeny dráhových parametrov

### b) Milankovič a zmeny klímy

# Pohyby Zeme

Základné pohyby, ktoré najvýznamnejšie vplyvajú na život na Zemi sú **obežný pohyb** a **rotačný pohyb**

Zem obieha okolo Slnka po **elipse** veľmi podobnej kružnici, pričom Slnko sa nachádza **v jednom z ohnísk elipsy**.



**Afélium a perihélium** V najvzdialenejšom bode svojej dráhy, v **aféliu** (odslní), je Zem od Slnka vzdialená 152 098 704 km a vtedy sa pohybuje najpomalšie – rýchlosťou 29,291 km/s. V najbližšom bode svojej dráhy, v **perihéliu** (príslní) je od Slnka vzdialená 147 097 149 km a jej obežná rýchlosť je 30,287 km/s. Medzi perihéliom a aféliom teda Zem na svojej dráhe nepatrne spomaľuje, medzi aféliom a perihéliom sa jej rýchlosť zvyšuje. V priebehu jedného roka rýchlosť Zeme kolíše asi o 1 km/s. Zmeny rotačnej rýchlosti v priebehu roka sú naproti tomu oveľa menšie, ale na rozdiel od zmien obežnej rýchlosti nezvratné.

Zmena vzdialenosti od Slnka však nie je príčinou striedania sa ročných období. Zem prechádza perihéliom okolo 4. januára, dva týždne po zimnom slnovrate, kedy paradoxne na severnej pologuli vrcholí zima. Aféliom zase Zem prechádza dva týždne po letnom slnovrate, kedy je na severnej pologuli leto. Oveľa väčší vplyv na teploty, ako okamžitá vzdialenosť od Slnka má totiž uhol, pod ktorým slnečné lúče dopadajú. Kvôli pomalšiemu pohybu Zeme v okolí afélia (v lete) trvá leto na severnej pologuli o niečo dlhšie ako zima.

Dráha Zeme v priestore je zložená z množstva periodických i neperiodických pohybov, ktoré vykonáva jednak pod vplyvom zotrvačnosti a tiež pod vplyvom gravitácie Slnka, Mesiaca, planét a iných telies slnečnej sústavy (i mimo nej).

Priemerná rovina, v ktorej obieha Zem okolo Slnka sa nazýva **ekliptika**. Používa sa ako základná rovina, voči ktorej určujeme sklony dráh všetkých telies v slnečnej sústave.

V súčasnosti sú hlavné parametre obežnej dráhy Zeme:

veľká polos  **$a = 149,598 \cdot 10^6 \text{ km}$**

najmenšia vzdialenosť od Slnka -  **$147,097 \cdot 10^6 \text{ km}$**

najväčšia vzdialenosť od Slnka -  **$152,098 \cdot 10^6 \text{ km}$**

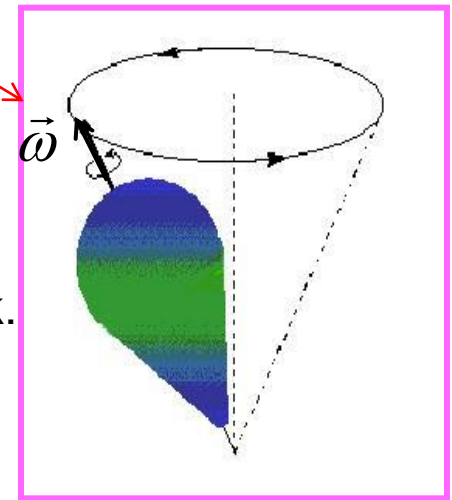
excentricita  **$e = 0,01671$**

sklon rotačnej osi k normále ekliptiky -  **$23^\circ,45$**

Zem obieha okolo Slnka v strednej vzdialenosti 149,598 miliónov km = 1 AU.

Stredná vzdialenosť Zeme od Slnka sa stala jednou zo základných astronomických jednotiek [dĺžky](#) a označuje sa ako [astronomická jednotka](#). Má skratku AJ alebo AU z anglického *Astronomical Unit*.

Vektor zemskej rotácie



Zem rotuje – rotačná os.

Zem si môžeme predstaviť ako obrovský zotrvačník.

V rotačnom pohybe sa skrýva obrovské množstvo energie

Kinetická energia rotácie Zeme	$E=1/2 J \omega^2$	$2,2 \cdot 10^{29} \text{ J}$
Úbytok v dôsledku <b>slapového</b> spomaľovania	$dE/dt=C(\omega-n_L)d\omega/dt$	$\sim 10^{19} \text{ J/rok}$
<b>Tepelný</b> tok (celý povrch)	q.S.1 rok	$\sim 10^{21} \text{ J/rok}$
Energia uvoľnená pri <b>zemetraseniach</b>		$10^{18} \text{ -- } 10^{19} \text{ J/rok}$
Energia uvoľnená pri <b>vulkanických</b> erupciách		$5 \cdot 10^{17} \text{ -- } 5 \cdot 10^{18} \text{ J/rok}$

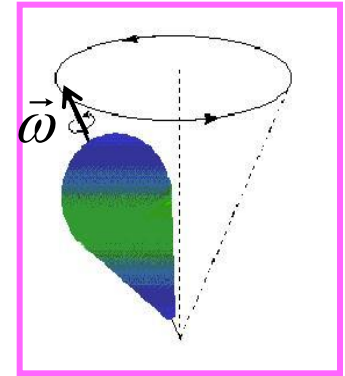
Preto nie je ľahké tento rotačný pohyb narušiť.

Dráha Zeme, jej obeh okolo Slnka a rotácia sú na škále ľudského života a modernej spoločnosti tak stabilné, že podľa nich boli definované základné fyzikálne jednotky – 1 sekunda, 1 astronomická jednotka ... Až zistené časové zmeny nás prinútili niektoré tieto jednotky predefinovať.

## ROTÁCIA ZEME :

Fakt, že rotačná os nie je v priestore stála, vieme už vyše 2000 rokov. Kozmické metódy určovania polôh bodov na povrchu Zeme a vonkajšieho gravitačného poľa dodnes dosiahli takú presnosť, že nastal výrazný pokrok v poznanií

- dynamiky vektora zemskej rotácie  $\vec{\omega}$ ,
- dynamiky elipsoidu zotrvačnosti,
- slapovej deformácie hladinových plôch geopotenciálu atmosféry, oceánov a zemskej kôry
- ďalších variácií geopotenciálu a
- deformácií zemského telesa neslapového pôvodu.



### Dynamika rotačného pohybu

Rotačná os Zeme vykonáva v priestore komplikovaný pohyb – predovšetkým **precesiu a nutáciu**.

Obečne môžeme na dokonale tuhú Zeme aplikovať **Eulerovu dynamickú teóriu o zotrvačníku** s jedným pevným bodom, ktorá vychádza z momentovej vety

$$\vec{T} = \frac{d\vec{L}}{dt} \quad \text{t.j. moment sily } T = \text{zmena momentu hybnosti } L \text{ za 1 sek.}$$

Úplná teória je veľmi zložitá, presahuje rámec tejto prednášky.

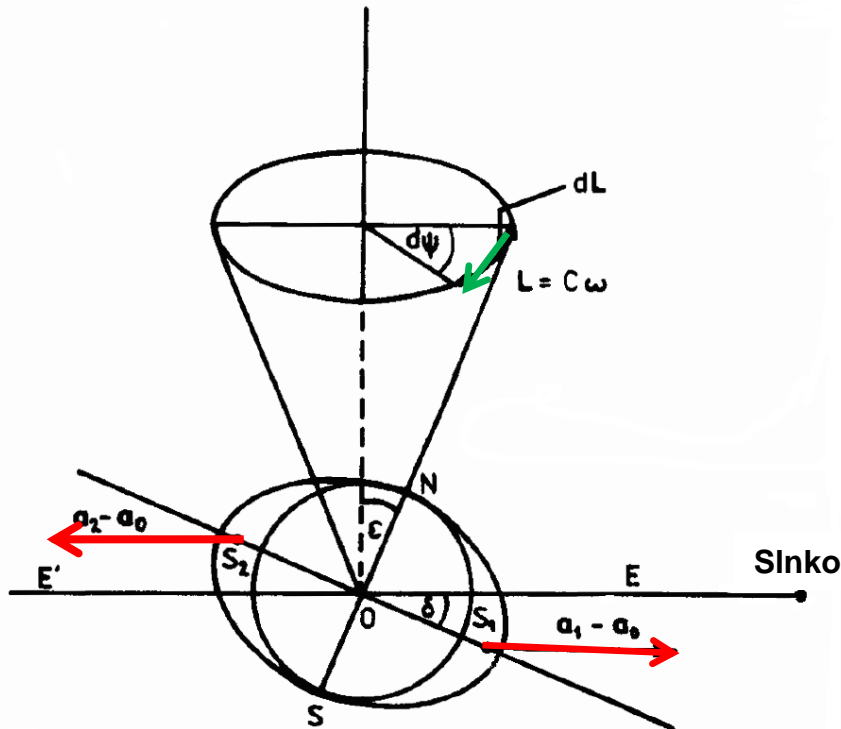
Ak existujú vonkajšie sily (hlavne od Mesiaca a Slnka) a pôsobia momentom  $\vec{T}$ , potom môžu meniť moment hybnosti otáčania Zeme – vzniká **precesia a nutácia** osi. Euler ukázal, že aj keď nepôsobia vonkajšie sily, okamžitá os rotácie opisuje vnútri Zeme kruhový kužel okolo osi najväčšieho momentu zotrvačnosti – tzv. **voľnú nutáciu**.



# Precesia

Precesiu vysvetlil z gravitačnej teórie I. 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.**



Rušiacie teleso spôsobuje v bodoch  $S_1, 0, S_2$  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

$$\vec{T} = \frac{d\vec{L}}{dt}$$

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



Pri matematickom vyjadrení točivého momentu využívame zákon akcie a reakcie: Slnko s hmotnosťou  $M_S$  a so súradnicami  $(r_S, \varphi_S)$  pôsobí na Zem rovnako veľkým, ale opačným točivým momentom ako Zem na Slnko, 

t. j.

$$\vec{T} = \vec{r} \times \vec{F} = \vec{r} \times M\vec{a} = \vec{r}_S \times M_S \vec{a} = \vec{r}_S \times M_S \cdot \text{grad } V$$

$$T = r_S M_S \text{grad}_\varphi V = M_S r_S \frac{\partial V}{r_S \partial \varphi}$$

Ak pre potenciál zemského rotačného elipsoidu vezmeme

$$V = -\frac{GM_Z}{r} \left[ 1 - \left( \frac{a}{r} \right)^2 \frac{C-A}{M_Z a^2} \left( \frac{3}{2} \sin^2 \varphi - \frac{1}{2} \right) \right]$$

$\varphi$  – zem. šírka

Potom pre točivý moment dostaneme

$$T = \frac{3 GM_S}{2 r_S^3} (C - A) \sin 2\varphi_S$$

$J_2$


Zemepisná šírka Slnka je vlastne jeho deklinácia ( $\varphi_S = \delta$ ), pričom táto kolíše v priebehu roka v intervale  $-\varepsilon \leq \delta \leq \varepsilon$ , kde  $\varepsilon$  je sklon ekliptiky k rovine rovníka. Účinok točivého momentu sa počas roka mení. Priemerný točivý moment je


$$T = \frac{3 GM_S}{2 r_S^3} (C - A) \sin \varepsilon \cos \varepsilon$$

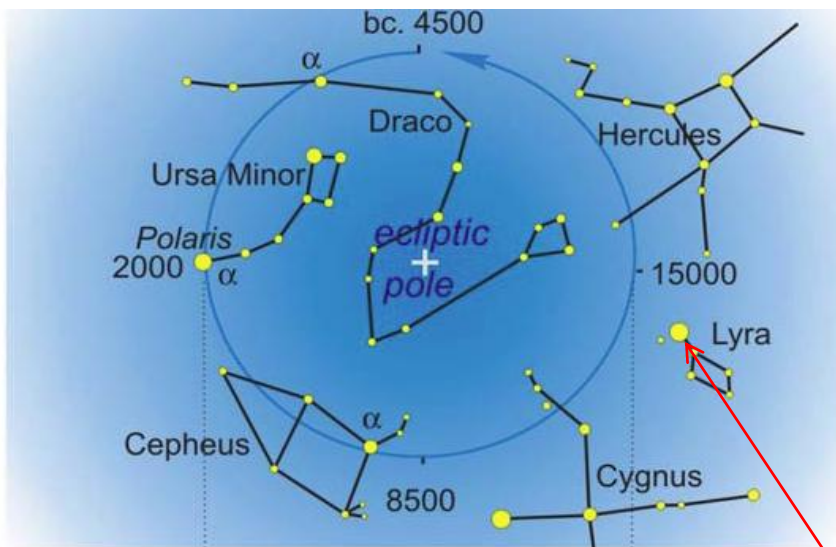
Takže pre rýchlosť precesie, t.j. pre posun jarného bodu vyjde 

$$\frac{d\psi_S}{dt} = \frac{T}{C\omega \sin \varepsilon} = -\frac{3 GM_S}{2 r_S^3} \frac{C-A}{C} \frac{1}{\omega} \cos \varepsilon$$

t.j. ak  $C=A$ , žiadna precesia nebude.

 to je pre nás výhodnejšie, lebo tiažové pole Zeme dobre poznáme, aj účinok rovníkových výdutí.

  $r \times (\text{grad}_r V) = 0$



Rýchlosť precesie spôsobená Slnkom je podľa meraní

$$\dot{\psi}_S = -15,92'' \text{ za rok}$$

Podobne dostaneme hodnotu precesie spôsobenú točivým momentom Mesiaca

$$\dot{\psi}_L = \frac{d\psi_L}{dt} = -\frac{3}{2} \frac{GM_L}{r_L^3} \frac{C-A}{C} \frac{1}{\omega} \cos \varepsilon'$$

$\varepsilon'$  je sklon dráhy Mesiaca k rovine rovníka. Rovina dráhy Mesiaca sa odlišuje od ekliptiky (kde sa nachádza Slnko) len o veľmi malý uhol  $5^\circ 8'$ , teda  $\varepsilon \approx \varepsilon'$  a účinky oboch telies možno algebraicky sčítať

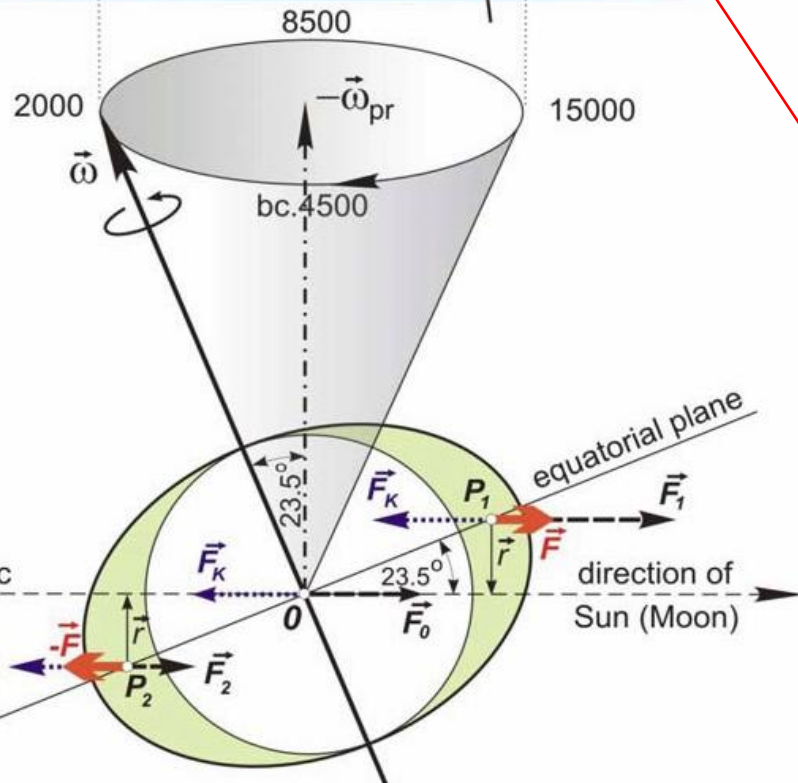
**Luni-solárna precesia** potom je

$$\dot{\psi}_{LS} = \dot{\psi}_S + \dot{\psi}_L = -15,92'' - 34,37'' = -50,29''$$

Pre epochu 2000

$$d\psi/dt = -50,290966'' + 0,0002222''T,$$

$T$  v Juliánskych storočiach. Perióda, tzv. **Platónsky rok**, je **25 777** rokov.

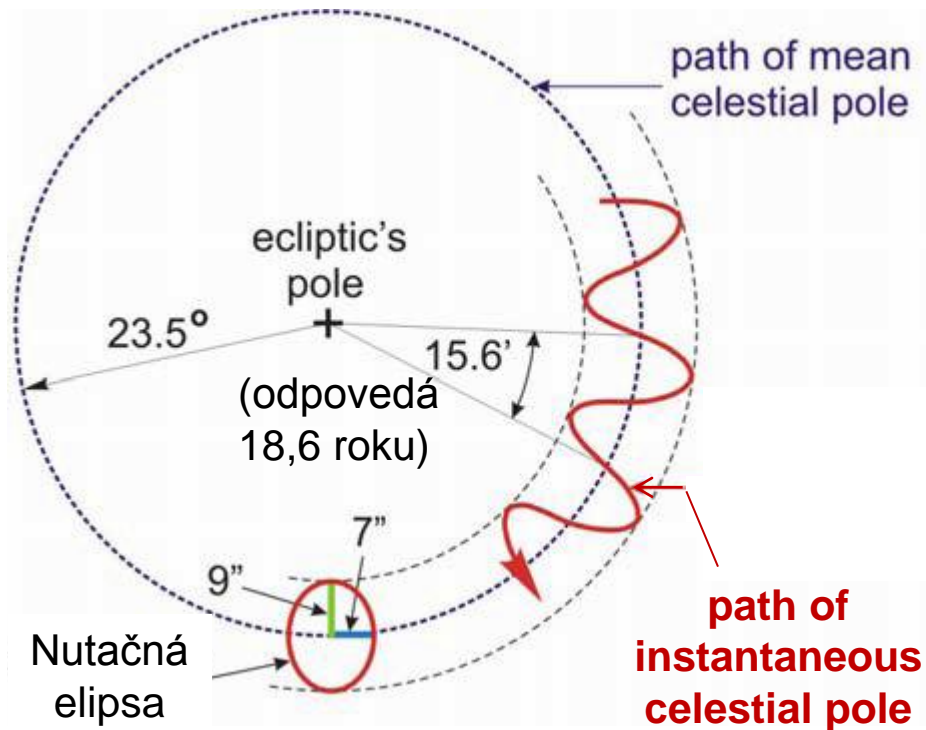


V dôsledku precesie sa jarný bod posunie o  $1^\circ$  asi za 72 rokov. Dnes mieri zemská os k Polárke, asi za 12 000 rokov bude mieriť približne k hviezde Vega v súhvezdí Lýra.

V dôsledku precesie už nesúhlasia znamenia zverokruhu s príslušnými súhvezdiami na oblohe; posun v ekliptikálnej dĺžke narástol už na takmer  $30^\circ$ .

Os rotácie musí opisovať **plášť kužeľa**, 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  $GM/r^3$ )



Okrem tohto precesného pohybu rotačnej osi vznikajú ešte (krátko-) periodické pohyby.

Tieto sú však menšie. – najväčší člen pochádza od stáčania uzlovej priamky dráhy Mesiaca (priesečník jeho dráhy s ekliptikou), ktorého perióda je 18,6 roka. ★

Toto spôsobuje 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.



## Voľná nutácia

LEONARD EULER (1707 – 1783) skúmal pohyb tuhého rotujúceho telesa, aj v prípade, že nepôsobia vonkajšie sily. Dokázal, že rotačná os vykonáva oscilácie hoci nie voči hviezdám, ale vzhľadom na povrch Zeme, ktoré sa nazývajú **voľná nutácia**.

Pre pohyb platia Eulerove dynamické rovnice, ale teraz  $\mathbf{T} = 0$ . Osi stotožníme s osami hlavných momentov zotrvačnosti (os  $z$  s najväčším momentom  $C$ ):

$$d\vec{L}/dt = \vec{T} \quad \text{teraz} = 0, \quad \vec{L} = J\vec{\omega}$$

$$A (d\omega_x/dt) + (C - B)\omega_y\omega_z = 0$$

$$B (d\omega_y/dt) + (A - C)\omega_x\omega_z = 0$$

$$C (d\omega_z/dt) + (B - A)\omega_x\omega_y = 0$$

Pre  $A = B$

$$A (d\omega_x/dt) + (C - A)\omega_y\omega_z = 0$$

$$A (d\omega_y/dt) - (C - A)\omega_x\omega_z = 0$$

$$C(d\omega_z/dt) = 0$$

Odtiaľ ľahko dostaneme, že  $\omega_z = \text{konšt.} = \omega_0$ , a tiež  $\omega_x^2 + \omega_y^2 = a^2 = \text{konšt.}$

Teda rýchlosť rotácie Zeme okolo okamžitej osi rotácie je konštantná a rovná

$$\omega = \sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2 + \omega_z^2} = \sqrt{\omega_0^2 + a^2} = \text{konšt.}$$

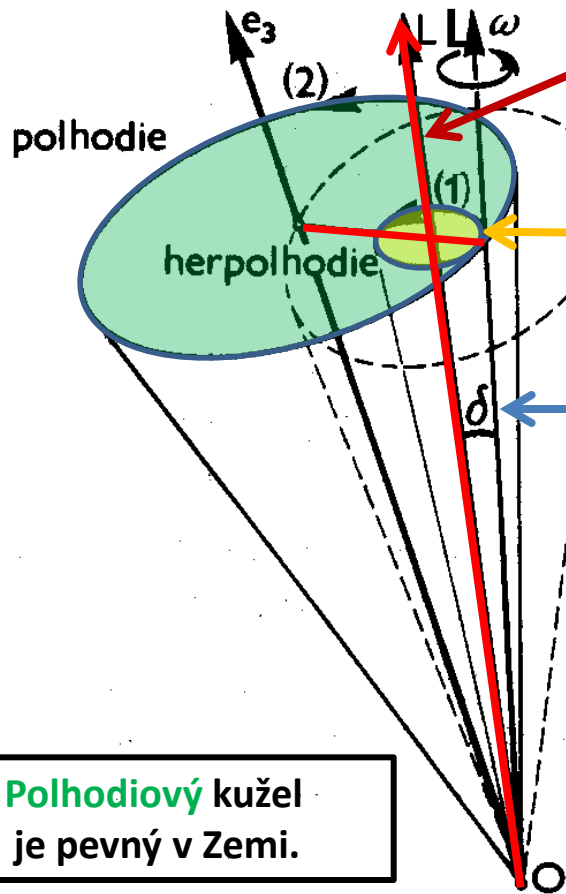
$\omega_0$  je rýchlosť rotácie v osi  $z$ , čo je os najväčšieho momentu zotrvačnosti

a okamžitá os rotácie opisuje vnútri Zeme okolo osi najväčšieho momentu zotrvačnosti  $C$  (okolo osi  $z$ ) kruhový kužeľ.

Pre tzv. Eulerovu periódu teoreticky vyjde

$$T_E = \frac{2\pi}{\omega_0} \frac{A}{C - A} = \frac{A}{C - A} \text{ hviezdnych dní} = 305 \text{ hviezdnych dní}$$

## Voľná nutácia



Polhodiový kužel je pevný v Zemi.

Keďže v tomto prípade  $\frac{d\vec{L}}{dt} = 0$ , moment hybnosti  $\vec{L}$  musí byť konštantný a pevne umiestnený v priestore.

Presné riešenie ukazuje, že os rotácie  $\omega$  preda len koná aj kruhový pohyb okolo  $\vec{L}$  (herpolhodiový – malý kužel).

Uhol medzi osou rotácie  $\omega$  a vektorom  $\vec{L}$  je  $\delta = 0,001''$ , čo zodpovedá na povrchu Zeme asi 3 cm, takže

➔ vektor  $\omega$  prakticky leží v smere  $\vec{L}$ , a malý kužel možno zanedbať.

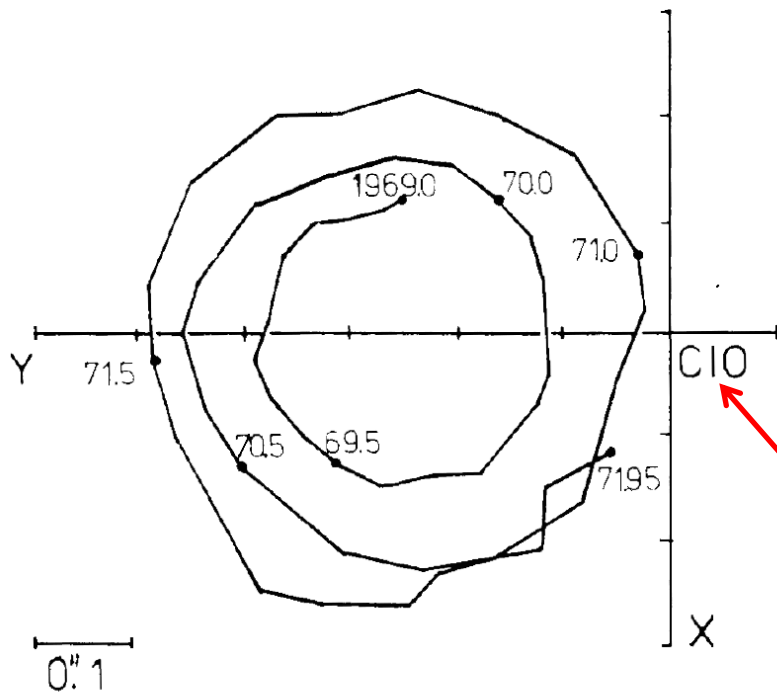
➔ Stred veľkého kužela (pól elipsoidu zotrvačnosti) koná kruhový pohyb okolo vektoru  $\omega$  (čiarkovane). V inerciálnej sústave, kde sú  $\vec{L}$  a prakticky aj  $\vec{\omega}$  pevné.

➔ Riešenie v neinerciálnej sústave spojenej so Zemou: Os rotácie  $\omega$  koná kruhový pohyb okolo osi elipsoidu zotrvačnosti (os  $e_3$ ) – polhodiový – veľký kužel.

## Variácia šírok.

**Pohyb osi rotácie v zemskom telese** (nie v priestore!) zistíme jednoducho pozorovaním zmien zemepisnej šírky na istom mieste – lebo o koľko sa posunie pól, o toľko sa nám zmení zemepisná šírka.

Na meranie a pravidelné sledovania tohto „kymácania“ pólu bola zriadená r. 1899 **Medzinárodná služba šírok (International Latitude Service)**. (The wobble is also called the **variation of latitude**.) Sieť observatórií tejto služby poskytovala údaje o perióde a ročných zmenách pohybu pólu po takmer celé 20-te storočie, kým nebolo nahradené inými metódami merania. Monitoring pohybu pólu od r. 1988 robí **Medzinárodná služba pre rotáciu Zeme**.



Súradnice  $x$ ,  $y$  **okamžitého rotačného pólu** sú definované vzhľadom na určitú strednú polohu  $P_0$ . Mala by to byť poloha **pólu elipsoidu zotrvačnosti**, ale poloha tohto pólu nebola doteraz presne určená.

Preto sa v praxi používa konvenčný počiatok (**CIO**, Conventional International Origin).

Tento je definovaný súborom konvenčných šírok 5 staníc, ktoré patria do ILS (International Latitude Service), pre rok 1900,0. Inak povedané CIO je priemerná poloha pólu určeného meraním šírok na piatich vybraných staniciach 1.1.1900.

Pohyb pólu v rokoch 1969,0 – 1971,95.

## Pohyb pólu

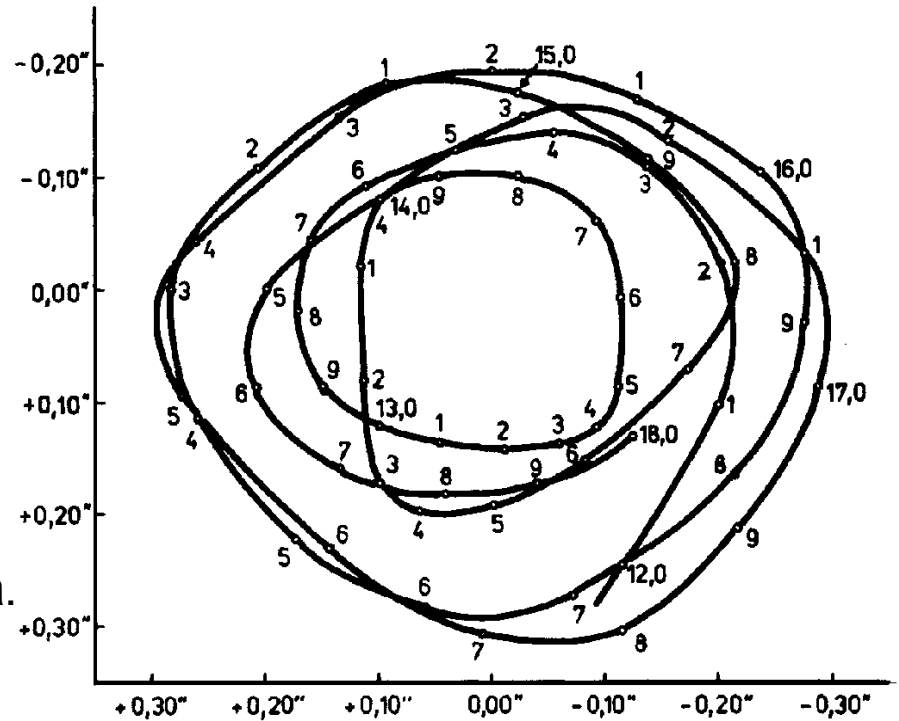
Krivka pohybu pólu je v štvorci s rozmermi 20 x 20 metrov, alebo 0,3" x 0,3".

## Chandlerova perióda

Eulerova perióda (305 dní) bola určená za predpokladu, že Zem je dokonale tuhá.

S plasticitou sa zväčšuje perióda kolísania širok:

Keby bola Zeme ideálnou kvapalinou, tak pri každom premiestnení rotačnej osi by sa ihneď prispôbilo rozloženie kvapaliny a os telesa by sa vždy stotožnila s okamžitou osou rotácie.





## Budenie Chandlerovho pohybu pólu

Amplitúda pohybu pólu sa stále mení, má výrazné fluktuácie z dekády na dekádu. Najväčšia bola okolo roku 1910. Charakteristické je, že v istých obdobiach sa znižuje, a potom sa opäť zväčšuje. Nastáva akýsi útlm a opätovná excitácia. Impulzy, ktoré opäť vzbudia voľnú nutáciou nie sú identifikované, ale z útlmu možno získať informácie o vnútri Zeme. Útlm je dôsledkom nepružného správania pevnej Zeme. Doba útlmu je asi 15 – 25 rokov.

Predpokladá sa, že Chandlerovo kývanie pólov je udržiavané zmenami v distribúcii hmôt vo vonkajšom jadre Zeme, v atmosfére, v oceánoch a v kôre (pri zemetraseniach). Avšak žiadny z pohybov sa **nezdá byť dostatočný** na udržiavanie Chandlerovho kolísania pólu. Otázka budenia je tak stále otvorená.

Okrem Chandlerovho pohybu pólu so strednou periódou 433 dní existuje nútený pohyb o kratších periódach, spôsobený presunmi atmosférických hmôt. Sezónny presun vzduchu, vody, snehu a ľadu medzi pevninami a oceánmi a medzi pologuľami je relatívne veľký. Dynamické atmosférické javy vysvetľujú pohyb pólu s **ročnou** periódou asi z 90%.

**Richard Gross (2000)** z Jet Propulsion Laboratory (JPL), California, použil počítačové simulácie, aby odhalil zdroje excitácie Chandlerovho kolísania pólu (Chandler wobble). Gross zistil, že **2/3** kolísania **by mohlo byť** spôsobené **fluktuáciami tlaku na dne morí** a oceánov v dôsledku **zmien teploty a salinity** a vetrami vynútenými zmenami cirkulácie oceánov. Zostávajúca **1/3** je dôsledkom **fluktuácií v atmosfére**.

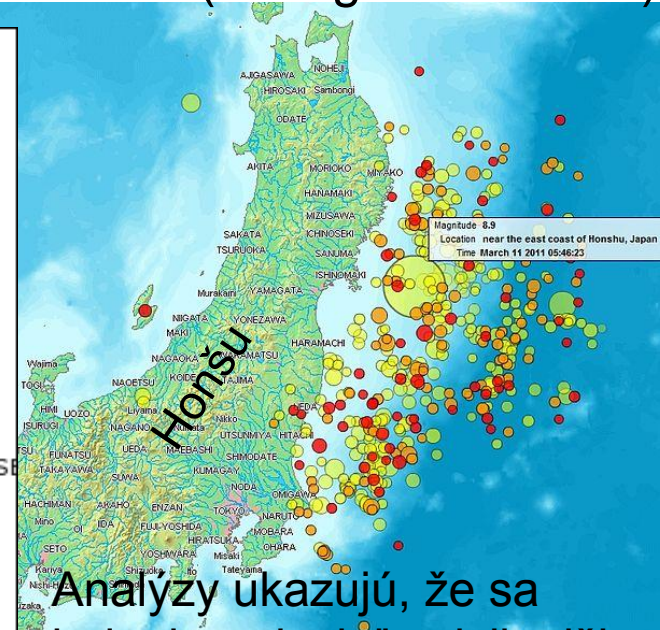
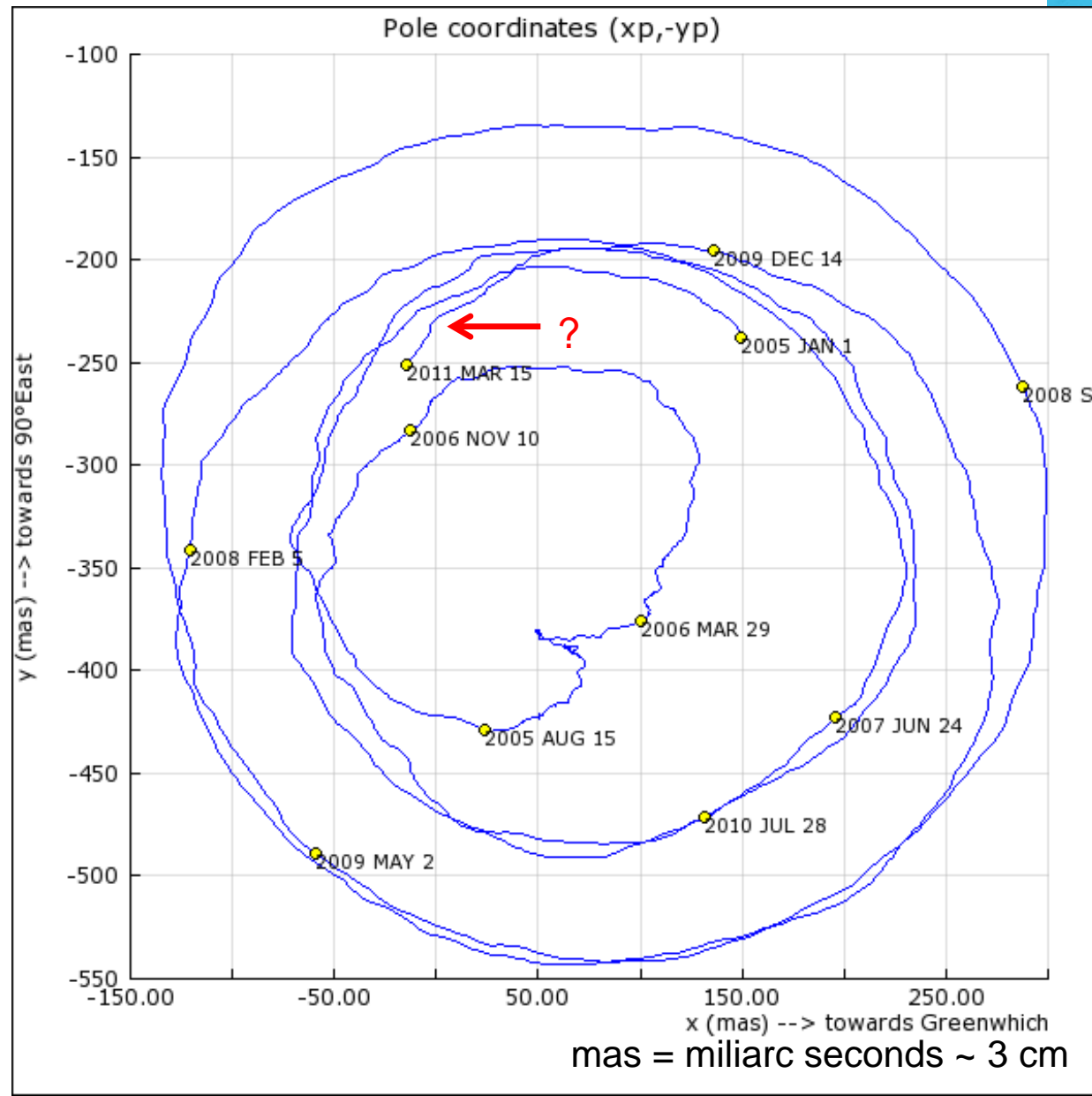
## Posun zemskej osi?

11. marca 2011 zasiahlo Japonsko obrovské zemetrasenie (s magnitúdom 8.9)  
Presuny hmôt dosiahli niekoľko metrov.



## Posun zemskej osi?

11. marca 2011 zasiahlo Japonsko obrovské zemetrasenie (s magnitúdom 8.9)



Analýzy ukazujú, že sa jednalo o dosiaľ najsilnejšie zemetrasenie, ktoré postihlo Japonské ostrovy a zároveň 4. najsilnejšie, ktoré bolo dodnes na Zemi zaznamenané.

Malo za následok posun ostrova Honšú o 2,4 m na východ, čo mohlo mať za následok posun zemskej osi asi o 10 cm.

▲ (k obr. Na predchádzajúcej strane) Pretože určenia polohy sa robia s presnosťou asi  $\pm 0,001''$ , t.j. asi 3 cm, mal by byť posun zemského pólu o 10 cm, vypočítaný R. Grossom, pozorovateľný, ak sa podarí adekvátne odstrániť väčšie efekty, t.j. od atmosféry a oceánov.

Dnes sleduje variácie vektora rotácie Zeme – **polohu aj veľkosť** IERS (International Earth rotation Service), ktorá začala činnosť 1.1.1988 a má ústredie v Paríži.

### Zmeny rýchlosti rotácie

Zmeny v dĺžke dňa si prvý všimol Edmond Halley v r. 1695, keď sledoval pohyb Mesiaca. Myslel si, že Mesiac zrýchľuje, ale bolo to spomaľovanie Zeme.

Meranie rýchlosti z. rotácie:

Staršie – astronomické

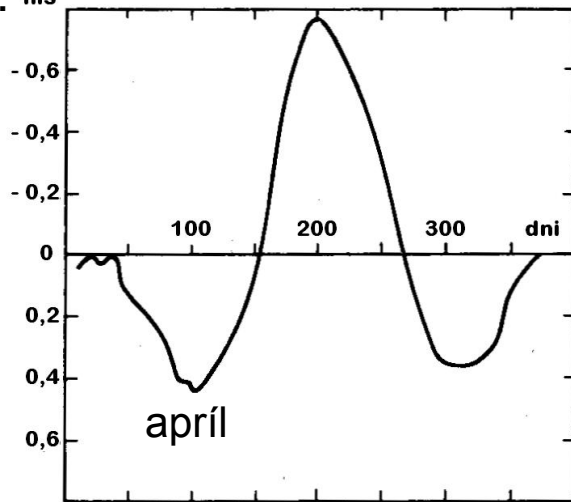
Dnes – 1) Laserové zameriavanie družíc a Mesiaca

2) Radiointerferometria z veľmi dlhých základní (interferenčné rádioteleskopické zameriavanie vzdialených zdrojov – kvazarov)

3) Využíva sa GPS (napr. Dr. Gross z JPL meria s presnosťou na stotiny milisekundy)

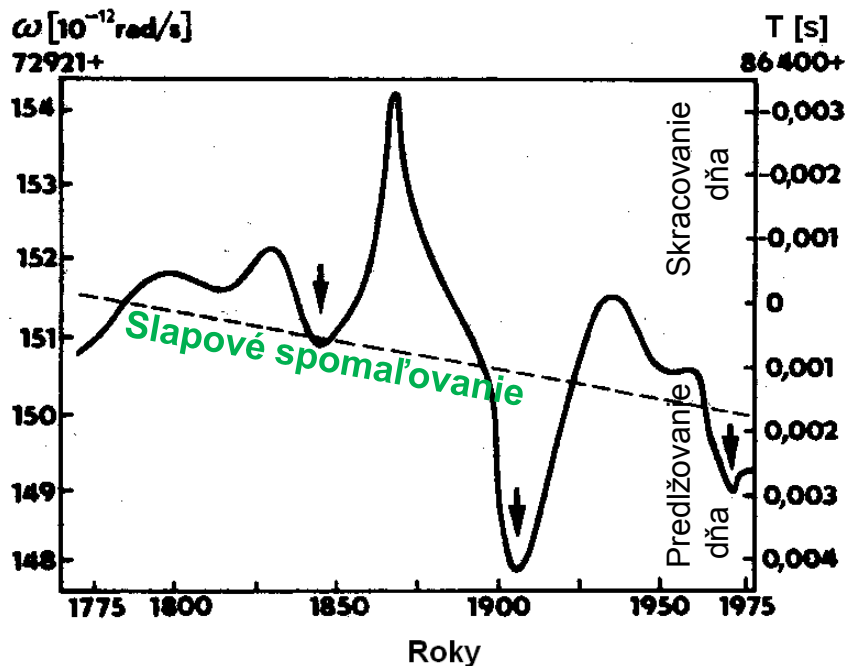
## Zmeny rýchlosti rotácie

Okrem slapového spomaľovania rýchlosti rotácie Zeme pozorujeme ešte tieto zmeny: ms



- 1) Dĺžka dňa sa v priebehu roka mení v medziach 1 ms. – t.j. ročná a polročná variácia. ◀ V apríli je deň o 0,5 ms dlhší, v júli je deň o 0,8 ms kratší.

Zmeny sú spôsobené výmenou momentov hybnosti medzi atmosférou a pevnou Zemou, pričom súčet momentov systému Zem + atmosféra sa musí zachovať. K efektu čiastočne prispievajú slapové zmeny hlavného momentu zotrvačnosti.



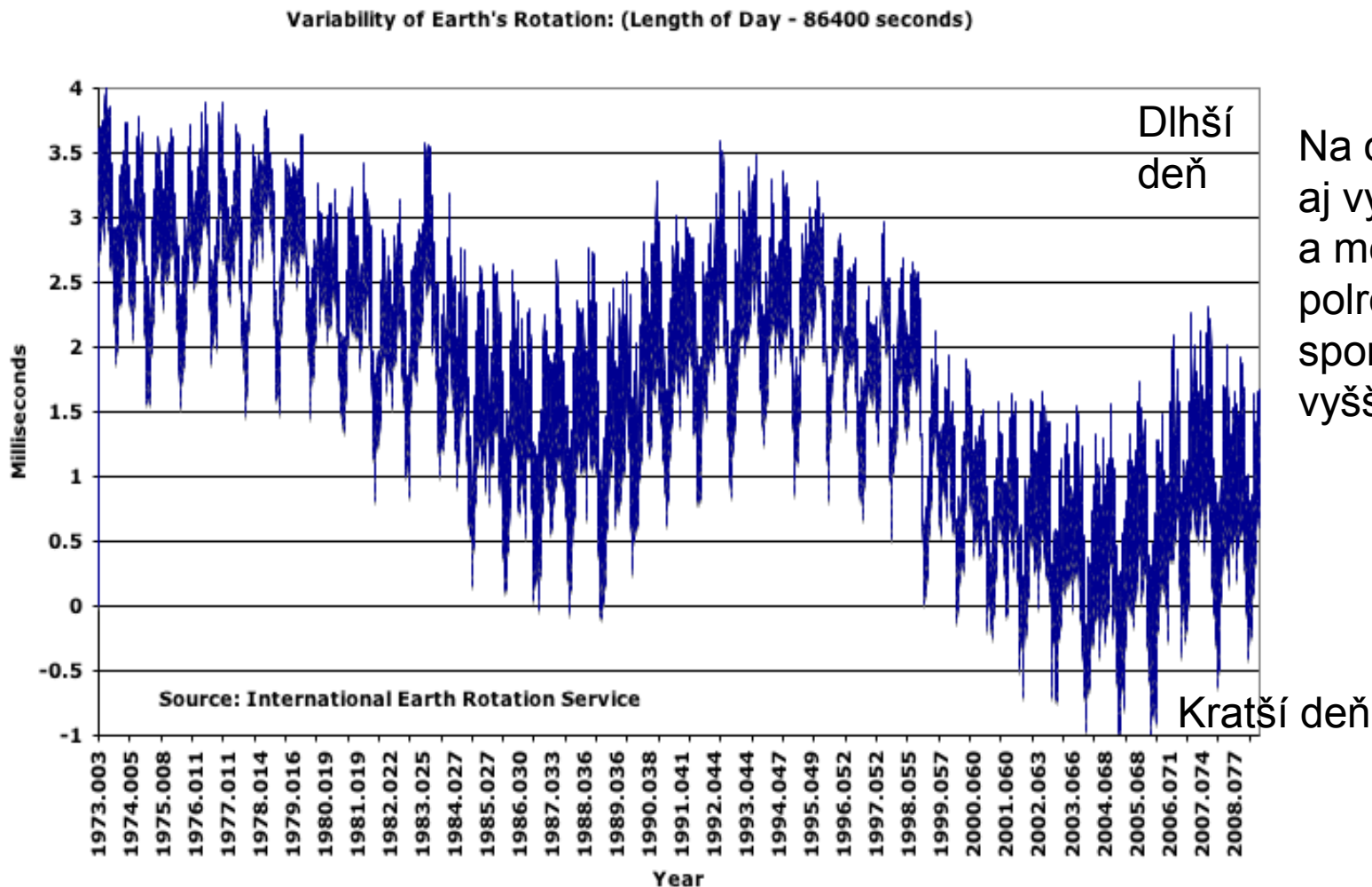
- 2) Dlhodobé variácie uhlovej rýchlosti, napr. r. 1775 – 1975.

◀ Obrázok ukazuje, že najpomalšie rotovala Zem v roku 1912, keď deň bol dlhší o 4 ms než nominálna dĺžka 86400 s.

Tri výrazné minimá (označené šípkou) korelujú s geomagnetickou aktivitou. Takže zmeny v pohybe tekutého jadra, ktoré generujú magnetické pole, môžu meniť aj rotáciu Zeme.

## Zmeny rýchlosti rotácie

Variabilita dĺžky dňa v poslednom období – najkratší deň bol v lete 2004 alebo v lete 2005, keď bol deň o 1 ms kratší ako 86400 s.



Na obrázku vidno aj výraznú ročnú a menej výraznú polročnú variáciu spomínanú vyššie.

LOD = Length of Day

## Zmeny rýchlosti rotácie a zemetrasenia

**Richard Gross** z NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL) použil svoj zložitý model na odhad zmien rýchlosti rotácie Zeme presunom hmôt pri najväčších pozorovaných zemetraseniach.

Samozrejme sklon osi a smer okamžitej osi rotácie vzhľadom na hviezdy sa nemení, lebo na to by boli potrebné externé sily.

Presun hmôt bližšie k rotačnej osi (zmenšenie momentu zotrvačnosti) spôsobí urýchlenie rotácie, podobne ako keď krasokorčuliar pripaží, jeho rotácia pri piruete sa urýchli. (Moment hybnosti  $L=C\omega=konšt.$ , preto keď sa zmenší  $C$ , tak  $\omega$  sa zväčší.)

### Výsledky výpočtov:

- Po 8,9 mag. zemetrasení v Japonsku 2011 sa rotácia urýchlila, deň sa **skrátil** o **1,4 mikro sekúnd**
- 9,1 mag. zemetrasenie pri Sumatre 2004 **skrátilo** deň o **6,8 mikro sek.**
- 9,2 mag. zemetrasenie na Aljaške 1964 **predĺžilo** deň o **6,8 mikro sek.**
- 9,5 mag. zemetrasenie v Čile 1960 **skrátilo** deň o **8,6 mikro sek.**

Sú to veľmi malé zmeny, nemerateľné. Sú 550-krát menšie než zmeny v dĺžke dňa počas roka. Aj keď zemetrasenia možno menia rýchlosť rotácie Zeme, s dlhodobého hľadiska majú minimálny význam.

Veľkosť efektu na rotáciu závisí nielen od veľkosti zemetrasenia, ale aj od polohy (efekt presunu hmôt závisí od vzdialenosti od rotačnej osi) a od detailov, k akému posunu došlo (smer). Znamienko efektu tiež závisí od konkrétneho pohybu v ohnisku.

## Obežná dráha Zeme v slnečnej sústave a dlhodobé variácie jej parametrov:

V súčasnosti sú hlavné parametre obežnej dráhy Zeme:

veľká polos  $a = 149,598 \cdot 10^6 \text{ km}$

najmenšia vzdialenosť od Slnka -  $147,098 \cdot 10^6 \text{ km}$

najväčšia vzdialenosť od Slnka -  $152,097 \cdot 10^6 \text{ km}$

excentricita  $e = 0,01671$

sklon rotačnej osi k normále ekliptiky -  $23^\circ,45$

Hoci parametre dráhy dominantne určuje príťažlivosť Slnka, **vzájomné gravitačné pôsobenie planét** vyvoláva pomalé (**sekulárne**) zmeny týchto parametrov obežnej dráhy Zeme (aj ostatných planét).

Zmeny sú **kváziperiodické**. Aký môžu mať rozsah?

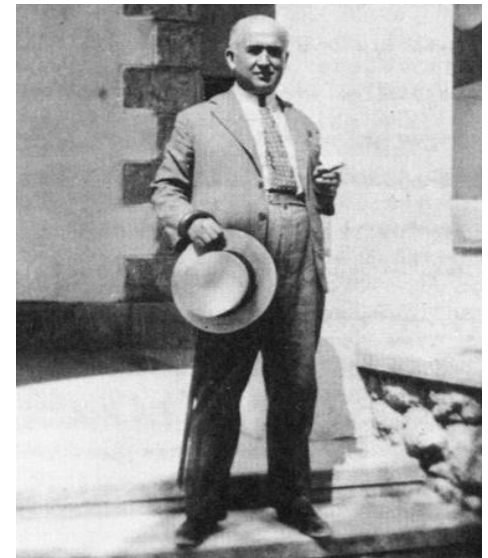
Srbský astronóm a klimatológ *Milutin Milankovič (1879 – 1958)* sa ako prvý pokúsil dať odpoveď vo forme teórie tzv. **Milankovičových cyklov**. Bol síce najprv odmietaný, ale dnešný stav tejto problematiky potvrdzuje, že mal v zásade pravdu.



**Milutin Milankovič**

▶ prvý upozornil na dlhodobé variácie parametrov obežnej dráhy Zeme, **vyvolané gravitačným pôsobením všetkých ostatných planét** (predovšetkým **Jupitera, Venuše a Saturna**).

Výpočty vykonával bez počítačov (!!), ale súčasne veľmi presné modelovanie vývoja slnečnej sústavy – **napr. parížska škola Prof. Laskara a ďalšie** – jeho závery (až na isté, celkom prirodzené numerické nepresnosti) – **potvrdilo**.



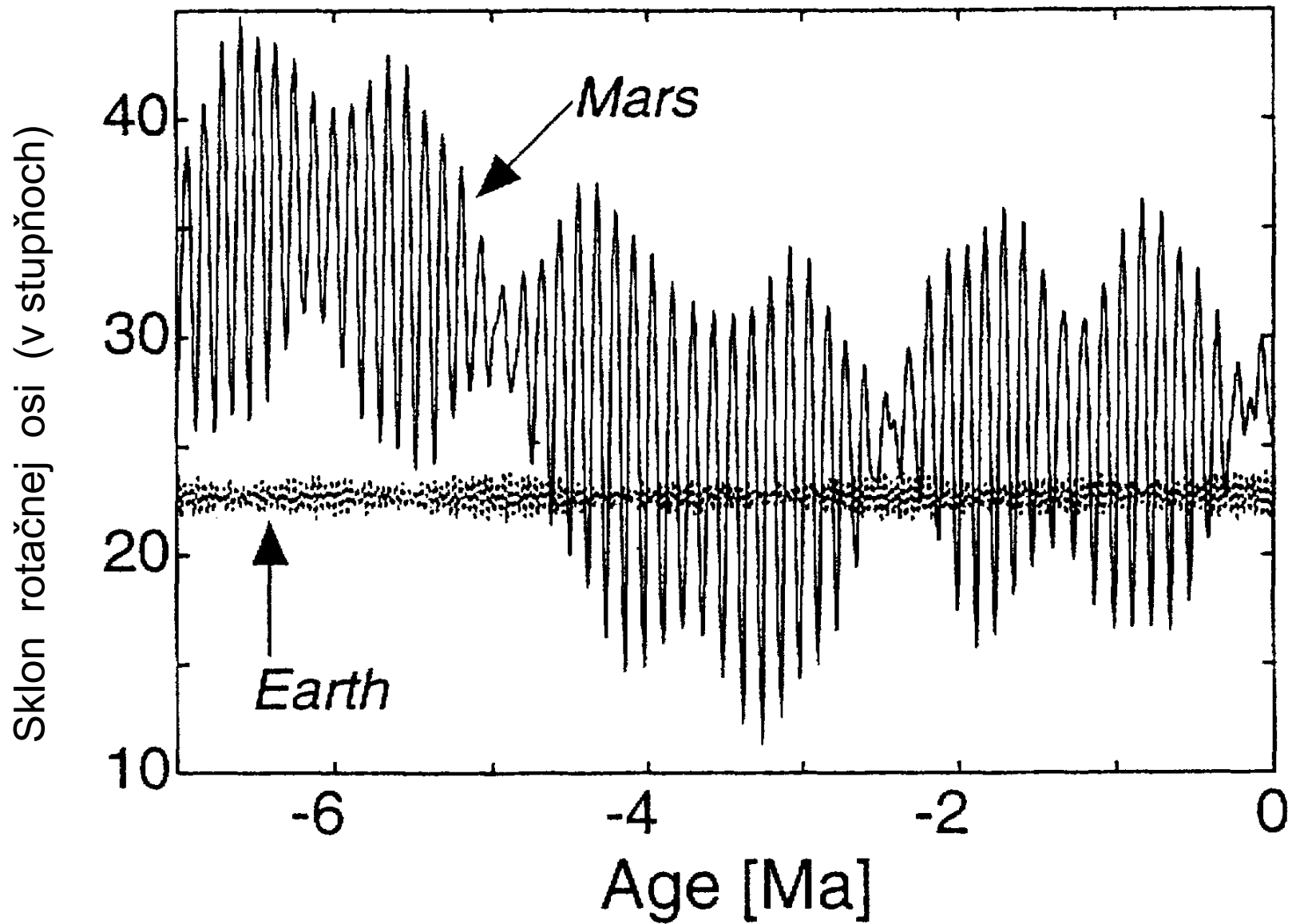
Podľa Milankoviča dochádza k cyklickým zmenám

- **excentricity zemskej dráhy**, kolíše v medziach 0,005 – 0,058 s periódami ~ 95 a 125 tisíc rokov; aj
- **sklonu rotačnej osi Zeme k ekliptike** kolíše medzi 22,1 – 24,5 s periódou asi 41 tisíc rokov (**súčasná hodnota 23,44 klesá**).

„**Stabilizátorom**“ sklonu je náš **Mesiac** ! Ako ukazujú výpočty, ak by Mesiaca nebolo, sklon rotačnej osi by kolísal v dlhších periódach, ale v rozsahu ~ **5 – 70** , **čo by takmer istotne znemožnilo biologický vývoj na Zemi**.

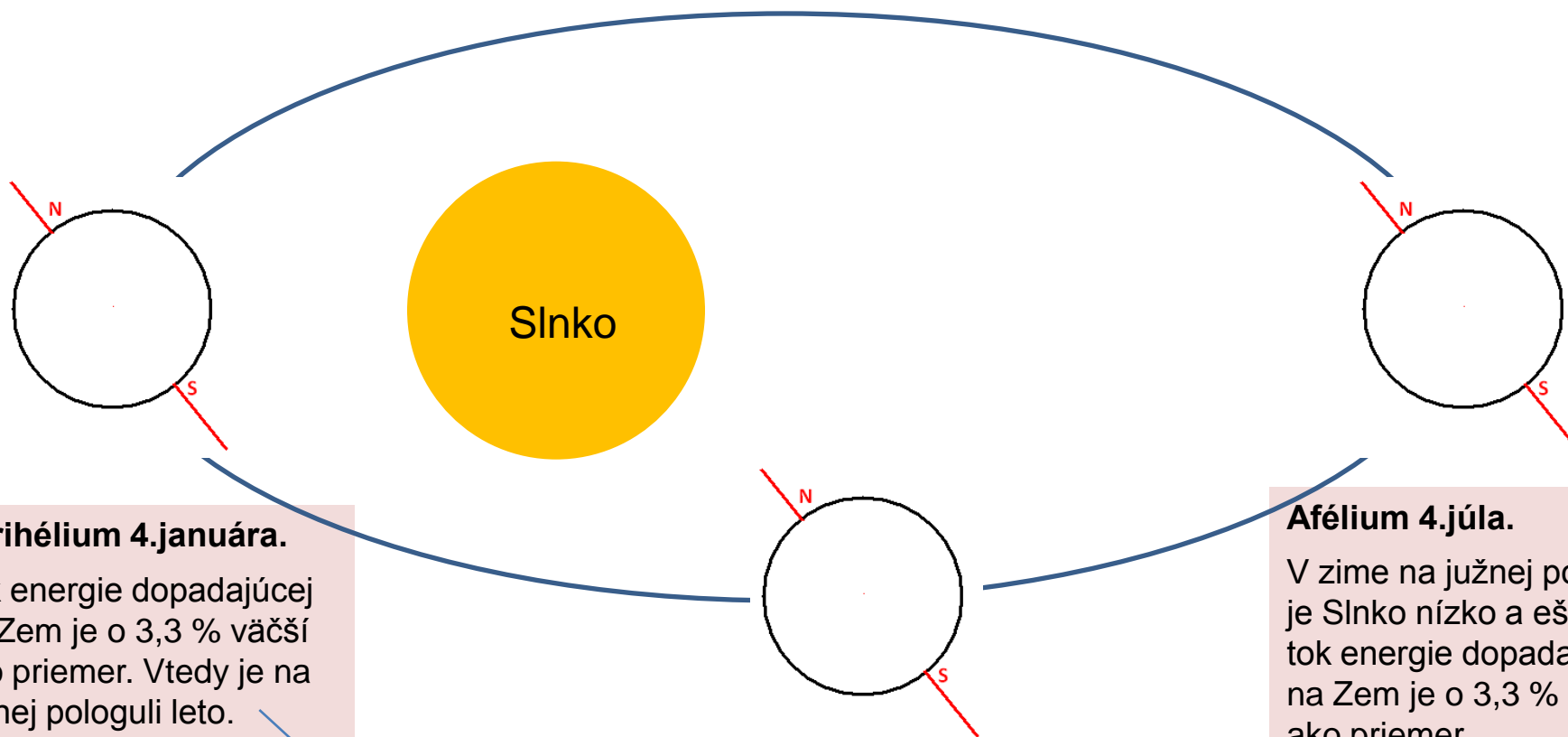
Okrem toho perióda precesie je okolo 26 000 rokov. Súčasne trochu pomalšie rotuje (vykonáva precesiu) eliptická dráha Zeme. Spojením týchto dvoch precesí vzniká kratšia, približne 21 tisíc-ročná perióda v striedaní sezón v čase perihélia – (tzv. **klimatická precesia alebo precesný index**).

**Sklon ekliptiky k tzv. „Laplaceovej čiže invariantnej rovine“** (určenej prevažne obežnými rovinami Jupitera a Saturna) kolíše v medziach **1,6** s periódou asi 70 tisíc rokov. Toto ale Milankovič neskúmal.



Stabilita sklonu Zemskej rotačnej osi v porovnaní s veľkými výkyvmi sklonu osi Marsu.

## Sklon a precesia rotačnej osi



### Perihélium 4.januára.

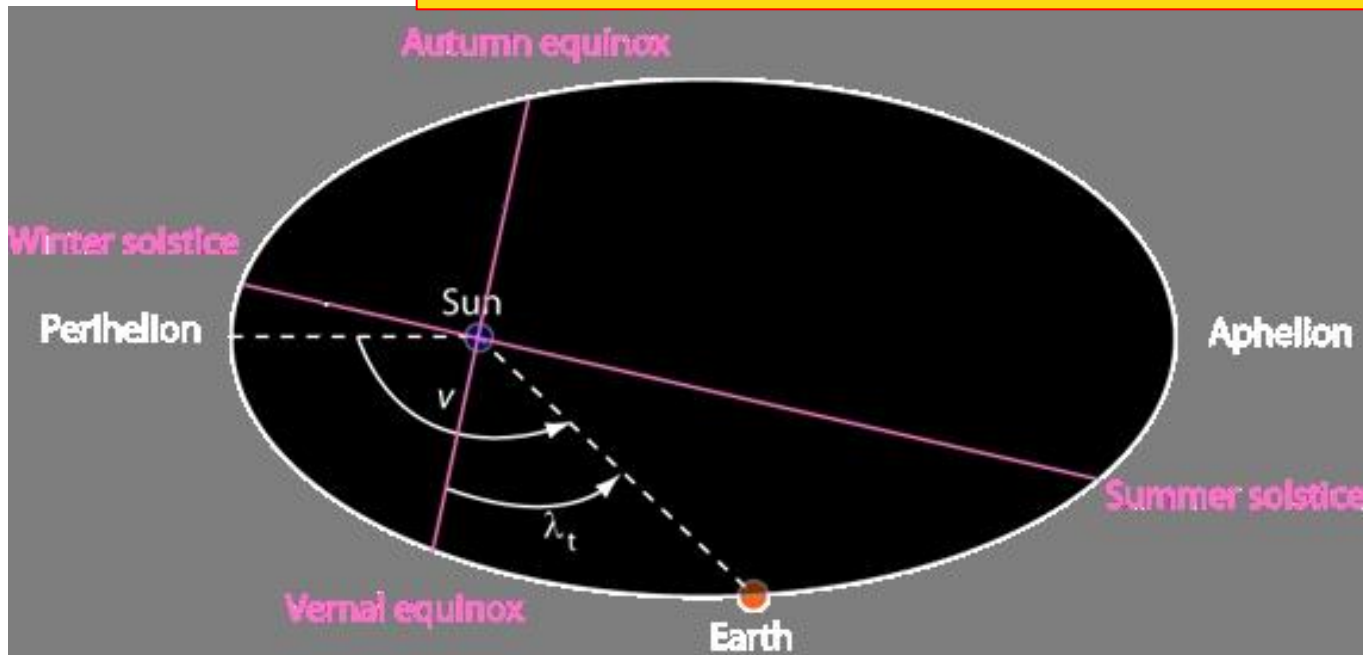
Tok energie dopadajúcej na Zem je o 3,3 % väčší ako priemer. Vtedy je na južnej pologuli leto.

### Afélium 4.júla.

V zime na južnej pologuli je Slnko nízko a ešte aj tok energie dopadajúcej na Zem je o 3,3 % menší ako priemer.

V súčasnosti je Zem v perihéliu počas leta na južnej pologuli (4. januára) a prichádza do afélia počas južnej zimy. To spôsobuje, že v súčasnosti sezóny na južnej pologuli sú o niečo extrémnejšie než na severnej pologuli, hoci ostatné faktory sú rovnaké.

## Vznik klimatickej precesie



**Dráha Zeme, poloha perihélia, jarného bodu, zimného a letného slnovratu a Zeme.**

(jarná rovnodennosť – vernal equinox).

Pretože Mesiac a Slnko pôsobia na sploštenú Zem a spôsobujú precesiu rotačnej osi, priesečník rovníka a ekliptiky (jarný bod) sa pomaly posúva – **precesia jarného bodu** s periódou 25 777 r.

Elipsa, po ktorej obieha Zem okolo Slnka tiež vykonáva precesný pohyb – **apsidálna precesia** (hlavná poloos – apsidy, spájajúca perihélium a aphélium sa otáča). Je to hlavne vďaka gravitačnému pôsobeniu Jupitera a Saturna.

Táto orbitálna precesia je v rovnakom zmysle ako „gyroskopická“ precesia rotačnej osi, čím sa skraca perióda precesie jarného bodu vzhľadom na perihélium z 25 777 na asi **21 636** rokov.

**Súčin  $e \cdot \sin \varpi$**  ( $e$  – excentricita,  $\varpi$  – pravá anomália, t.j. uhol meraný od pohybujúceho sa jarného bodu k perihéliu) je tzv. **precesný index**, alebo **klimatická precesia**, lebo súvisí so **vzdialenosťou Slnko-Zem v čase letného slnovratu**.

# Milankovitch Cycles

Milankovičove cykly v minulosti a budúcnosti.

orbitálne parametre vypočítané zo sekulárnych variácií

$\epsilon$  je „obliquity“ (sklon osi) ~ 41 kyr.

$e$  je excentricita ~ 95, 125, 400 kyr.

$\varpi$  je dĺžka perihélia,

$e \cdot \sin(\varpi)$  je precesný index (~ 19, 22, 24 kyr).

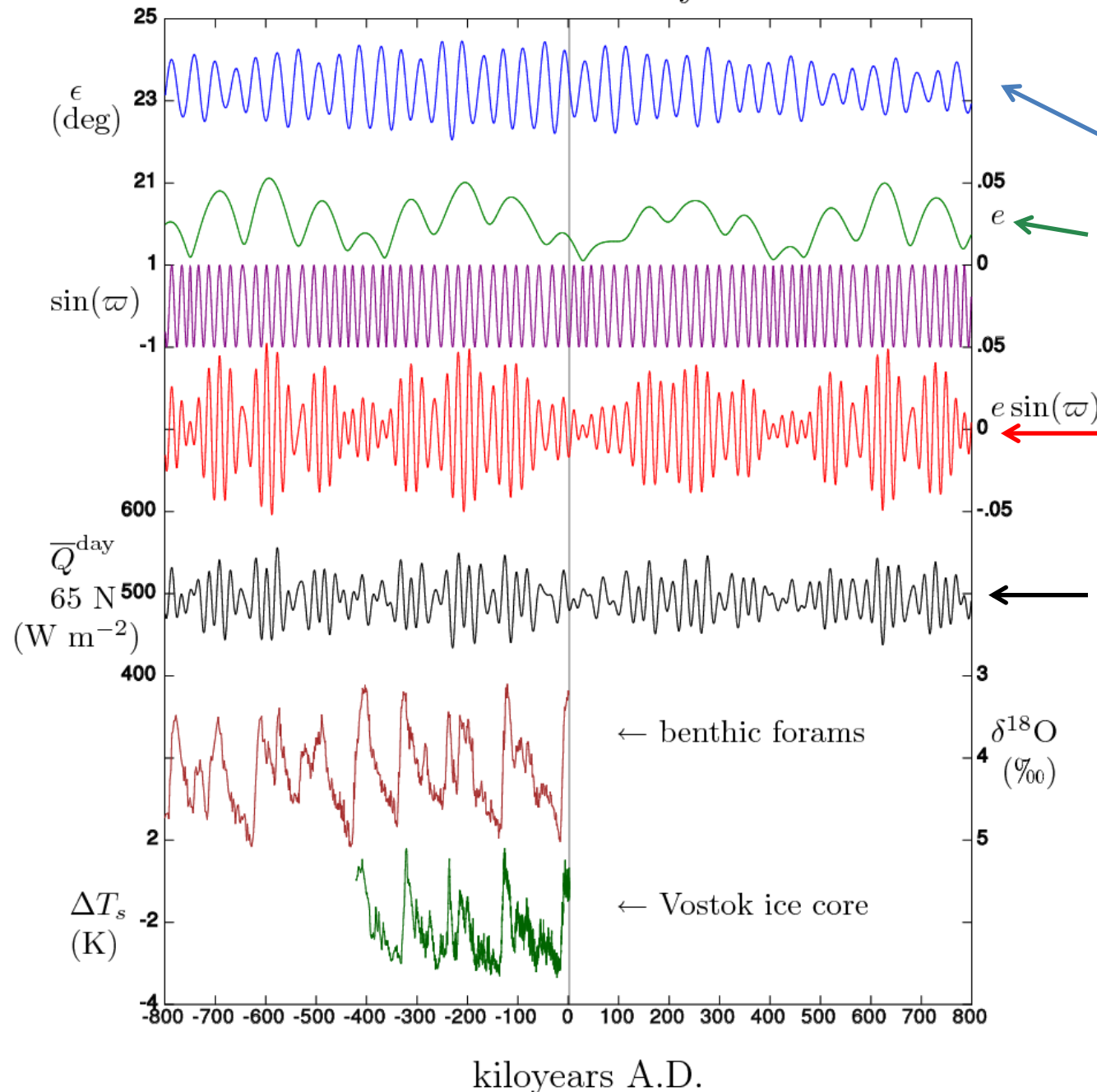
Tento spolu so sklonom osi kontroluje sezónne cykly ožiarenia.

$Q^-$  je priemerné denné množstvo žiarenia, ktoré dopadá na atmosféru v deň letného slnovratu na 65°N.

*Benthic forams* (sedimenty s biomasou z oceánskeho dna) ukazujú zmeny obsahu  $^{18}\text{O}$  a tým hladinu morí v minulosti

*Vostok ice core* (ľadovcové jadrá z Antarktídy) ukazujú teplotu

Zvislá čiara – súčasnosť



Titulný list práce M. Milankoviča (1941), ► v ktorej **ako prvý** upozornil – a doložil – vplyv **dlhodobých variácií parametrov obežnej dráhy Zeme** na vývoj **klímy**, najmä **ľadových dôb**.

Milankovič, matematik a stavebný inžinier, pôsobil ako profesor na belehradskej univerzite. Jeho práce boli spočiatku odmietané, bol aj zosmiešňovaný, ale neskôršie podrobné výpočty mu dali v podstate za pravdu.

Teóriu podporili hlavne vrty do oceánskeho dna, ktorých analýza podporila striedanie teplých a studených období. Prielom nastal článkom [Hays](#), [Imbrie](#), and [Shackleton](#), "Variations in the Earth's Orbit: Pacemaker of the Ice Ages", v [Science](#) (1976), kedy teória dostala dnešnú podobu.

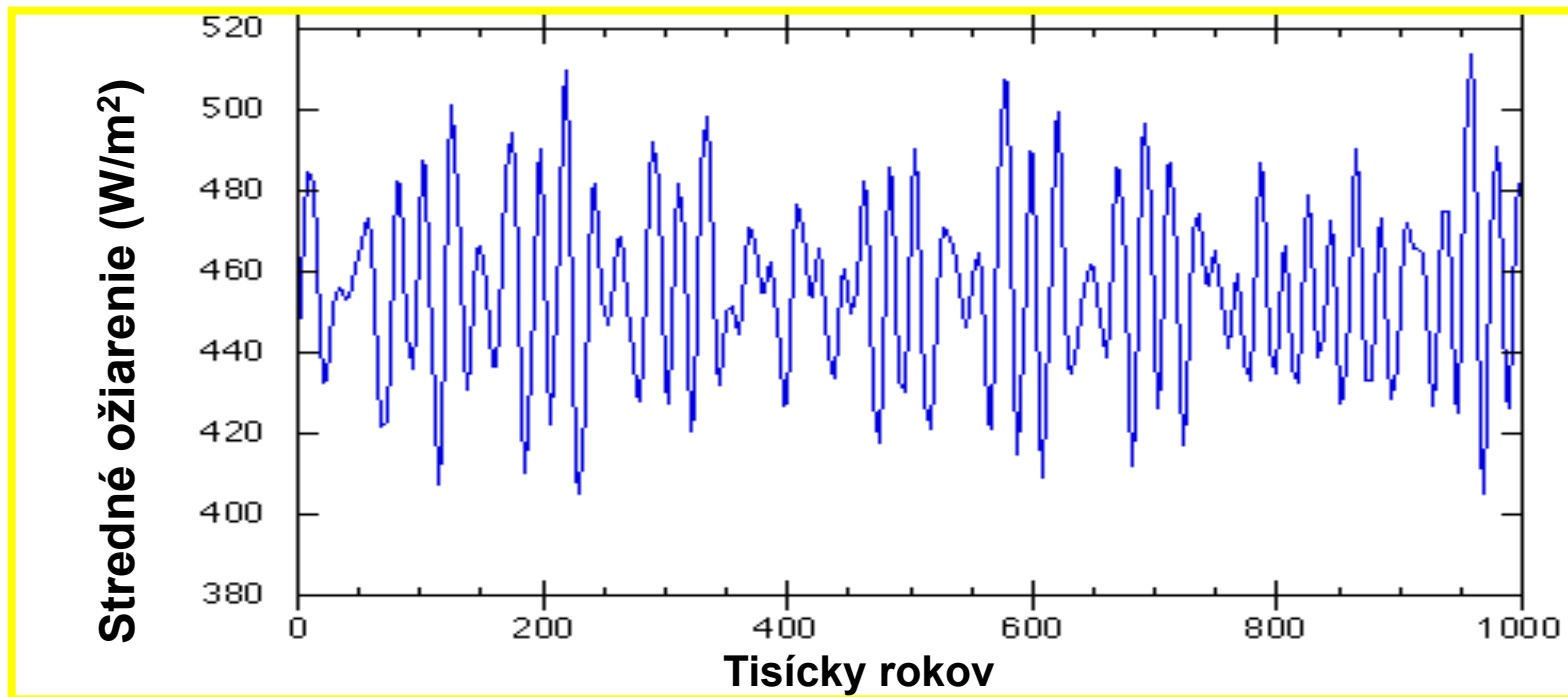
Variácie každého z parametrov (sklon osi, excentricita atď.) brané samostatne javia sa málo významné (na to poukazovali odporcovia), ale ich **synergický efekt je výrazný**.



Dnes je pojem a dôsledky (paradigma) Milankovičových cyklov pevnou súčasťou geofyziky a klimatológie.

Hoci úhrnné množstvo slnečného žiarenia dopadajúceho na Zem sa variáciami dráhových elementov nemení, mení sa **kontrast v ožiareni** v rôznych polohách v rôznych ročných obdobiach a to spôsobuje zmeny klímy. Počas ľadových dôb sú paradoxne zimy miernejšie a letá chladnejšie a to rozhoduje o výslednej tepelnej bilancii.

Zdá sa, že **leto na severnej pologuli** je kľúčovým bodom pre klímu pri súčasnom rozmiestnení kontinentov (Milankovich, 1930). Na severnej pologuli sa tvorí rozsiahlejšia zimná snehová pokrývka, o osude ktorej sa rozhoduje v lete. Minimum v letnom ožiareni oblastí 65°N umožní, že snehová pokrývka sa udrží po celý rok – nastupuje doba ľadová.



Graf priemernej *povrchovej insolácie* na 65°N (vo  $\text{W.m}^{-2}$ ) až do  $10^6$  rokov do minulosti. Zmeny sú v rozsahu **10 %** strednej hodnoty, čo má ale pre dlhodobý vývoj klímy značný význam!

## Na záver – elastické vlastnosti Zeme

Viaceré spomínané javy skúmame preto, že ich môžeme využiť na určenie vlastností Zeme.

Na charakterizovanie elastických vlastností Zeme ako celku slúžia dva bezrozmerné parametre  $h$  a  $k$  (tzv. Love-ove čísla – zaviedol Love v r. 1909) a Shidovo alebo Lambertovo číslo  $\ell$ .

Definované sú takto:

$h$  je pomer výšky prílivu reálnej Zeme a výšky statického prílivu;

$h = 0$  pre dokonale tuhú Zem;  $h = 1$  pre dokonale tekutú.

$k$  je pomer potenciálu vyvolaného premiestnením hmôt a slapového potenciálu, ktorý toto premiestnenie spôsobil.

$k = 0$  pre dokonale tuhú Zem; horná hranica pre teleso s hustotou rastúcou dovnútra je  $k < 0,6 h$ .

$\ell$  sa určuje meraním horizontálnych napätí.

Napriek tomu, že tieto parametre majú jednoduchý fyzikálny význam, súvisia s rozložením hustoty a s **modulom pružnosti v šmyku** v Zemi. Popisujú odozvu Zeme na vonkajšie sily spôsobené elasticitou Zeme. **Dôležité je to, že každý typ deformácie možno charakterizovať kombináciou týchto čísel.**



## Na záver – elastické vlastnosti Zeme

Napr. 
$$\frac{\Delta g_{el}}{\Delta g_{tuh}} = 1 - \frac{3}{2}k + h$$

pôsobenie vertikálnej zložky slapových síl na elastickej Zemi je  $(1 - \frac{3}{2}k + h)$ -krát silnejšie ako na tuhej, t.j. zmena tiaže na elastickej Zemi  $\Delta g_{el}$  je toľko-krát väčšia než  $\Delta g_{tuh}$  na tuhej Zemi.

$$\frac{\Delta \varphi_{el}}{\Delta \varphi_{tuh}} = 1 + k - h$$

t.j. odchýlka zvislice, ktorá vzniká účinkom tangenciálnej zložky slapových síl, je na elastickej Zemi  $(1+k-h)$ -krát väčšia než na tuhej Zemi.

$$T_{CH} = T_E \left( \frac{\alpha - \frac{q}{2}}{\alpha - \frac{q}{2} - \frac{kq}{2}} \right)$$

Vzťah pre periódu voľnej nutácie na elastickej Zemi, závisí od Love-oho elastického čísla **k**.

Veličina	Metóda	Hodnota
k	z dráh umelých družíc	0,39 ± 0,05
	zo zmeny dĺžky dňa	0,34 ± 0,05
	z Chandlerovej periódy	0,28 ± 0,02
1+k-h	zo slapov v jazerách	0,56
1- $\frac{3}{2}$ k+h	z meraní tiaže	1,14 - 1,20
1+k-l	z variácií širok	1,13
l	z meraní napätí	0,05

Hodnoty  $h=0,7$ ;  $k=0,3$ ;  $l=0,1$  vyjadrujú integrálne vlastnosti Zeme ako celku. Možno ich vypočítať pre určitý konkrétny model Zeme, a opačne, správnosť prijatého modelu môže byť overená pozorovanými hodnotami Love-ových čísel.