

## 6. POHYBY ZEMĚ

- rotace Země, oběh Země kolem Slunce, pohyb se sluneční soustavou
- pohyby zemské osy: precese, nutace

### 6.1 ROTACE ZEMĚ

- rotace od západu k východu, perioda rotace  $T$  (siderický den) 23 h 56 min 4,1 s
- **obvodová rychlost**  $v_0 = 2 \pi r_\phi / T = 2 \pi r_Z \cos \phi / T$   
(rovník  $465 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $50^\circ$  z. š.  $299 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , pól nulová)
- **úhlová rychlost**  $\omega_Z = 2\pi / T$
- **odstředivá rychlost** – maximální na rovníku, nulová na pólech

#### 6.1.1 Fyzikální základy zemské rotace

- **zákon zachování momentu hybnosti** (součin úhlové rychlosti  $\omega_Z$  a momentu setrvačnosti  $I_Z$ ), tj. žádná vnitřní síla nemůže změnit jeho hodnotu, tedy osa rotace je jakoby stabilizována v prostoru a otáčející tělese se přemísťuje jen tak, že osa rotace je rovnoběžná sama se sebou – důsledky:
  - a) největší změny  $I_Z$  působí přerozdělení hmot v krajinné sféře Země
  - b) **vnější síly** mohou měnit orientaci rotační osy nebo její rychlost (deformace tělesa, přerozdělení hmot)
  - c) **vnitřní síly** v případě přerozdělení hmot způsobí pootočení tělesa vzhledem k ose rotace (změna zeměpisných souřadnic) – změny úhlové rychlosti rotace při radiálním přesunu hmot

#### 6.1.2 Důkazy zemské rotace

- **nepřímé důkazy** plynoucí ze zdánlivého otáčení nebeské sféry:
  - a) Kdyby vzdálená vesmírná tělesa měla oběhnout Zemi za 24 hodin, musely by být jejich rychlosti nepředstavitelně velké.
  - b) Je velmi nepravděpodobné, že by různě vzdálená vesmírná tělesa měla přesně stejně dlouhé oběžné doby.
  - c) Všechna vesmírná tělesa přístupná pozorování se otáčejí.

- **přímé důkazy**

- a) **Coriolisova síla** (uchylující síla zemské rotace)

**Obr. 13.2a/274**

- vzdálenost koule s rychlostí  $v$  od středu za čas  $t$ :  $r = r_0 + vt$
- kotouč s úhlovou rychlostí  $\omega$  se za čas  $t$  otočí o úhel  $\omega t$
- vzdálenost koule od základního směru:  $z = z_0 + (r_0 + vt) \omega t$
- $z$  se považuje za konstantní přírůstek „odchylující se dráhy“ koule od základního směru, jehož derivací dostaneme:

- a) okamžitou rychlost:  $r_0\omega + 2v\omega t$

- b) zrychlení koule (velikost Coriolisova zrychlení):  $2v\omega$

**Obr. 13.2b/275**

- vektorová interpretace Coriolisova zrychlení:

$$a_c = 2v_1\omega$$

$$a_c = 2v \omega \sin \alpha$$

### Obr. 13.3/276

- rozklad vektoru úhlové rychlosti zemské rotace v různých částech Země:

$$\omega_1 = \omega_Z \sin \varphi, \omega_2 = \omega_Z \cos \varphi$$

#### b) Foucaultův kyvadlový pokus – vlastnost kyvadla zachovat si rovinu kyvu

- na severním pólu: rovina kyvu se otáčí od východu k západu, tj. zemský povrch se otáčí v opačném směru úhlovou rychlostí  $\omega_1 = \omega_Z = 360^\circ/T$  (tj.  $15^\circ$  za 1 hvězdnou hodinu)

- v obecné šířce  $\varphi_A$ :  $\omega_1 = \omega_Z \sin \varphi_A = 15^\circ \sin \varphi_A$  za 1 hvězdnou hodinu

- na rovníku:  $\omega_1 = 0$

#### c) odchylka padajících těles – k východu

$$x = 2,2 \cdot 10^{-5} h^{3/2} \cos \varphi \quad (h = 100 \text{ m}, \varphi = 50^\circ, x = 0,014 \text{ m})$$

### 6.1.3 Změny v rotaci Země

- nerovnoměrnost zemské rotace
- **dlouhodobé zpomalování** rychlosti - prodloužení délky dne o 0,001-0,002 s za století  
analýza růstu fosilních korálů: kambrium (500 mil. let – 21 h – 415 dnů/rok), perm-karbon (280 mil. let – 22,5-22,8 h – 385-390 dnů/rok), svrchní křída (70 mil. let – 23,67 dne – 370,3 dne/rok)
- **skoky v rotaci** (0,0034 s)
- **sezónní nepravidelnosti** (periody: roční – amplituda 0,022s, půlroční 0,010s, 13,8 a 27,6 dne – menší než 0,001s)
- **dlouhoperiodická složka** – 18,66 a – amplituda 0,15s

### 6.1.4 Důsledky zemské rotace

- **vychylování pohybujících se objektů**

$$F_c = 2 m \omega_Z v \sin \varphi$$

pohyb vzduchu (tropické cyklony, pasáty, západní přenos vzduchu)

pohyb vodních částic (stáčení mořských proudů, Peruánský proud, pohyb ledů)

asymetrie říčních koryt – tzv. **Baerův zákon**: pravé břehy řek na severní polokouli jsou za stejných podmínek strmější než levé břehy

- **střídání dne a noci**

denní rytmus procesů a jevů (denní chod meteorologických prvků)

- **pohyb slapové vlny**

- **zdánlivý pohyb nebeské sféry**

kulminace hvězd – poloha, čas

- **tvar Země**

zmenšování pólového zploštění Země

### Obr. 13.5/281

## 6.2 OBĚH ZEMĚ KOLEM SLUNCE

### 6.2.1 Základní parametry oběžného pohybu Země

- oběh Země kolem společného těžiště soustavy Slunce – Země ( $X = 4,4995 \cdot 10^6$  m)
- pohyb Země kolem Slunce popsán Keplerovými zákony (viz kap. 4.1.2a)
- ekliptika – ekliptikální souhvězdí
- siderický rok

### 6.2.2 Důkazy oběhu Země kolem Slunce

- **nepřímý důkaz** – porovnání hmotností
- **přímé důkazy:**
  - a) roční paralaxa hvězd
    - velká poloosa zdánlivé paralaktické elipsy (zorný úhel, pod kterým je vidět z hvězdy poloměr zemské dráhy)
    - Proxima Centauri  $0,763''$ , Polárka  $0,008''$

*Obr. 13.6/283*

#### b) aberace hvězd

- jev, kdy pohybující se pozorovatel vidí světelný zdroj v jiném směru, než by ho viděl v témž okamžiku, kdyby byl v klidu (úhel mezi skutečným a zdánlivým směrem na světelný zdroj)

*Obr. 13.7a/284*

*Obr. 13.7b/284*

- použitím sinové věty pro trojúhelník  $Z_1O_1Z_2$  lze psát:
$$vt/\sin \alpha = ct/\sin \beta \rightarrow \sin \alpha = v/c \sin \beta$$
- po dosazení pro  $\beta = 90^\circ$  dostaneme aberační konstantu  $\alpha_0 = 20,5''$
- $\alpha = 20,5'' \sin \beta$
- aberace roční (na rozdíl od paralaxy neovlivněna vzdáleností hvězdy), denní

### 6.2.3 Důsledky oběhu Země kolem Slunce

- stálý sklon zemské osy k rovině ekliptiky  $66^\circ 33'$
- úhel mezi ekliptikou a rovinou rovníku  $\varepsilon = 23^\circ 27'$

*Obr. 13.8/285*

#### 6.2.3.1 Střídání ročních období

- důsledek stálého sklonu zemské osy k rovině ekliptiky

*Obr. 13.9a/286*

##### a) den letního slunovratu (21.6.)

- začátek astronomického léta
- úhel dopadu slunečních paprsků  $\alpha = 90^\circ - (\varphi - \varepsilon)$
- kolmo na obratník Raka

*Obr. 13.9b/286*

##### b) den podzimní rovnodennosti (23.9.)

- začátek astronomického podzimu
- úhel dopadu slunečních paprsků  $\alpha = 90^\circ - \varphi$
- kolmo na rovník

*Obr. 13.9c/287*

### c) den zimního slunovratu (22.12.)

- začátek astronomické zimy
- úhel dopadu slunečních paprsků  $\alpha = 90^\circ - (\varphi + \varepsilon)$
- kolmo na obratník Kozoroha

*Obr. 13.9d/287*

### d) den jarní rovnodennosti (21.3.)

- začátek astronomického jara
- úhel dopadu slunečních paprsků  $\alpha = 90^\circ - \varphi$
- kolmo na rovník

*Obr. 13.9c/287*

- různá délka astronomických ročních období kvůli různé rychlosti Země na oběžné dráze
- severní polokoule: nejdelší astronomické léto, nejkratší astronomická zima
- prodlužování léta, podzimu a zimního půlroku

### 6.2.3.2 Délka dnů a nocí na Zemi (soumrakové jevy)

viz kap. 3.1.2.1-3.1.2.2

### 6.2.3.3 Klimatické (teplotní) pásy Země

- tropický pás (polední výška Slunce od  $43^\circ$  do  $90^\circ$ )
- mírné pásy severní a jižní polokoule (polední výška Slunce od  $0^\circ$  do  $90^\circ$ )
- polární pásy severní a jižní polokoule

- úhel dopadu slunečních paprsků
- **solární konstanta**  $I_0$  je celková intenzita elektromagnetického záření Slunce, dopadajícího na horní hranici zemské atmosféry na jednotkovou plochu kolmou k paprskům při střední vzdálenosti Země – Slunce ( $r = 1 \text{ AU}$ )  
 $I_0 = 1353,732 \text{ W.m}^{-2}$
- intenzita záření je nepřímo úměrná čtverci vzdálenosti od zdroje, proto  
 $I_S = I_0 (r/r_S)^2$   
 $I_S$  v přísluní  $+3,44 \%$ , v odsluní  $-3,23 \%$  než  $I_0$   
astronomicky příznivější podmínky pro zimy a méně příznivé pro léta na severní polokouli v porovnání s jižní polokoulí
- intenzita záření dopadajícího na horizontální plochu je insolace  $I_h$   
 $I_h(a', b) = I_S(a, b)$ ,  $a/a' = \cos z_S$ ,  $I_h = I_S \cos z_S$   
po dosazení:  $\cos z_S = \sin \varphi \sin \delta_S + \cos \varphi \cos \delta_S \cos t_S$  je tzv. **extraterestrální insolace**  
 $I_S = I_0 (r/r_S)^2 (\sin \varphi \sin \delta_S + \cos \varphi \cos \delta_S \cos t_S)$

*Obr. 13.12a/296*

- roční režim extraterestrální insolace – **solární klima**
- a) rovník: 2 maxima v období rovnodenností, 2 minima v období slunovratů, malá amplituda

- b) mimotropické šířky: jedno minimum a jedno maximum, v den letního slunovratu na pólu insolace větší o 36 % než na rovníku, druhotné maximum kolem 40° s.š.
- v období rovnodenností hodnoty insolace symetricky kolem rovníku
  - v zimě mezi rovníkem a pólem největší rozdíl v insolaci
  - z nestejně rychlosti Země ale plyne vyrovnávání úhrnů extraterestrální insolace v odpovídajících šířkách severní a jižní polokoule v týchž obdobích

*Obr. 13.12b/297*

*Tab. 13.5/298*

#### 6.2.3.4 Perioda oběhu Země kolem Slunce jako základ kalendáře

- tropický rok

#### 6.2.3.5 Výskyt meteorů

- vyšší četnost ve druhé polovině noci

*Obr. 13.13/299*

#### 6.2.4 Dlouhodobé změny parametrů zemské dráhy

- astronomická hypotéza (M. Milanković 1930)
- glaciály (stadiály, interstadiály) a interglaciály
- (donau) gūnz, gūnz-mindel, mindel, mindel-riss, riss, riss-wūrm, wūrm
- kvartérní klimatický cyklus – 15-20
- změny parametrů zemské dráhy:

##### a) sklon zemské osy

- $\varepsilon = 22^{\circ}04' - 24^{\circ}34'$ , perioda 41000 let
- růst  $\varepsilon \rightarrow$  růst deklinace Slunce  $\rightarrow$  růst výšky Slunce nad obzorem v létě (léto teplejší)  
 $\rightarrow$  pokles výšky Slunce nad obzorem v zimě (zima chladnější)

*Tab. 13.6/300*

##### b) délka perihelu $\Pi$ (úhlová vzdálenost přísluní od jarního bodu) – perioda 21000 let

- Země se dostává nejbližší ke Slunci v různých částech roku (období kratší a teplejší)
- nastává následující cyklus:

a)  $\Pi = 0^{\circ}$  - jarní rovnodennost v přísluní, podzimní v odsluní (léto odpovídá zimě)

b)  $\Pi = 90^{\circ}$  - v přísluní Země v době zimního slunovratu, v odsluní v době letního slunovratu (zima kratší a teplejší, léto delší a chladnější)

c)  $\Pi = 180^{\circ}$  - podzimní rovnodennost v přísluní, jarní v odsluní (léto odpovídá zimě)

d)  $\Pi = 270^{\circ}$  - v přísluní Země v době letního slunovratu, v odsluní v době zimního slunovratu (léto kratší a teplejší, zima delší a chladnější)

##### c) výstřednost zemské dráhy $e$

$e = 0,0007-0,0658$ , perioda kolem 100 000 let

nejkratší období v přísluní, nejdelší v odsluní (relativně teplejší resp. chladnější období)

- vznik zalednění (akumulace, ablace) – zima relativně teplá, léto relativně chladné
- graf ekvivalentních šířek pro 65° s.š. (šířky, které dostávají v současnosti v tzv. letním kalorickém půlroce stejné množství slunečního tepla jako v minulosti 65°)  
růst ekvivalentní šířky – ochlazení a naopak

*Obr. 13.14/301*

## 6.3 POHYBY ZEMSKÉ OSY

### 6.3.1 PRECESE

- pravidelný pohyb osy rotujícího tělesa, na které působí nějaká vnější síla
- Země – homogenní koule (nebo ze sférických vrstev stejné hustoty) – směr osy a perioda rotace konstantní
- Země – rotační elipsoid – rovníkové přebytky hmoty – dvojice sil

*Obr. 13.15/302*

- **zemská osa opisuje plášť kužele s vrcholem ve středu Země – precese**
- perioda precese – platónský rok 26000 let
- a) precese lunisolární
- b) precese planetární
- c) precese celková (generální)

*Obr. 13.16/303*

### 6.3.2 NUTACE

- kmity volně rotujícího setrvačníku, kdy osa rotace je nesymetrická k rozložení hmoty
- **drobná kolísání pólu kolem střední polohy – nutace**
- perioda nutace 18,66 roku – stáčení uzlové přímky Měsíce

### 6.3.3 DŮSLEDKY PRECESE A NUTACE

#### a) změna polohy světového pólu

*Obr. 13.17a/404*

- severní světový pól se nachází v blízkosti **Polárky** (nejblíže v roce 2103 – 27')

#### b) změna polohy bodů rovnodennosti

*Obr. 13.17b/304*

změna polohy světového rovníku a ekliptiky – posuny bodů rovnodennosti

na počátku roku: ekliptika  $E_0$ , rovník  $r_0$ , jarní bod  $v_0$

po roce: ekliptika  $E$ , rovník  $r$ , jarní bod  $v$

lunisolární precese:  $v_0 \rightarrow B$

planetární precese:  $B \rightarrow v$

celková (generální) precese v délce  $p = 50,28'' \cdot \text{rok}^{-1}$

celková precese v deklinaci  $n = 20,04'' \cdot \text{rok}^{-1}$

celková precese v rektascenzi  $m = 46,11'' \cdot \text{rok}^{-1}$

- **důsledky posunu bodů rovnodennosti:**

- a) pomalá změna začátku astronomických ročních období
- b) tropický rok asi o 20 min kratší než siderický
- c) změna astronomických souřadnic (ekliptikální délka, deklinace, rektascenze)
- d) pozvolná změna vzhledu nebeské sféry

### 6.3.4 POHYBY ZEMSKÝCH PÓLŮ

- měření zeměpisné šířky v Greenwiche:

1836-1841  $51^\circ 28' 38,43''$

1842-1848  $51^\circ 28' 38,17''$

1851-1860  $51^\circ 28' 37,92''$

- neshoduje se osa rotace a osa symetrie → zemské těleso se posunuje vzhledem k ose rotace → posun pólů po zemském povrchu (**krátkodobé pohyby**)
- Mezinárodní služba pro studium pohybu pólů
- periodický charakter pohybu (Eulerova – kolem 12 měsíců, Chandlerova – 14 měsíců v důsledku plastičnosti a pružnosti země)

***Obr. 13.18/307***

- **dlouhodobé pohyby zemských pólů**
- **pólová síla** – úměrná výšce desky a  $\sin 2\varphi$ , nulová na pólech a rovníku, max. na 45° s.š.
- posun litosférických desek ve směru 97° v.d. k rovníku, tedy **pohyb severního pólu k 83° z.d.** (cm za rok – 1000 km za 10 miliónů let)

***Obr. 13.19/308***