

# Dynamika rotace Země

Jan Vondrák

*Pod dynamikou zemské rotace rozumíme změny její úplné orientace v prostoru. Jde tedy nejenom o změny rychlosti vlastní rotace, ale též o pohyb osy rotace vzhledem k tělesu samému i vzhledem ke hvězdám. Parametry orientace Země určují transformační vztahy mezi pozemským a nebeským systémem souřadnic, a mají tedy v astronomii fundamentální význam. Tento komplexní pohyb je ovlivňován jednak vnějšími silami (především Měsícem a Sluncem), jednak přesuny hmot na povrchu Země i uvnitř ní.*

Jenom některé z těchto pohybů jsme přitom schopni předem vypočítat na základě vhodných modelů; většinu je nutné neustále zjišťovat z pozorování. Takovátoto pozorování pak slouží pro definování a realizaci fundamentálních souřadnicových systémů (nebeského i pozemského), při studiu vnitřní stavby Země či mechanismu přenosu momentu hybnosti mezi tekutými složkami Země a její pevnou částí, při kosmické navigaci, v geodézii atd.

## Stručně o teorii rotace Země

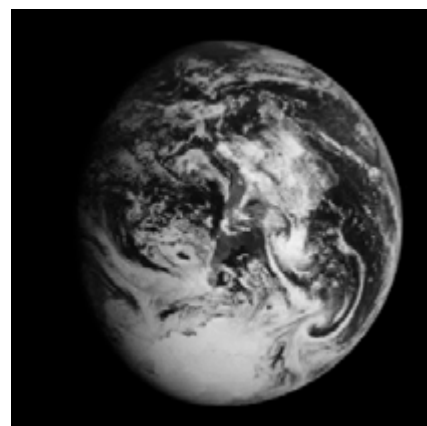
Pokud bychom Zemi považovali za tuhé (rotačně symetrické a mírně zploštělé) těleso, na které nepůsobí žádné vnější síly, byla by situace poměrně jednoduchá. Rotaci takového tělesa řeší tzv. Eulerovy rovnice, ze kterých vyplývá, že takové těleso by rotovalo stálou rychlostí okolo osy, jejíž směr v nebeské souřadnicové soustavě by zůstával neměnný. Poloha této osy v tělese by se však neměnila pouze v tom případě, kdybychom je na počátku roztočili přesně okolo hlavní osy momentu setrvačnosti. Pokud by počáteční směr osy rotace byl odkloněn od směru hlavního momentu setrvačnosti byl jen o malý úhel, opisovala by osa rotace pomalu kladným směrem (tj. proti směru otáčení hodinových ručiček) plášť kužele kolem hlavní osy setrvačnosti, a to jednou za 305 dní (tzv. Eulerova perioda), přičemž úhel mezi oběma osami by byl neustále konstantní. Délka periody tohoto tzv. volného pohybu pak závisí pouze na zploštění Země a rychlosti její rotace, nikoliv na úhlu odchýlení směru osy rotace od směru hlavního momentu setrvačnosti.

Ke složitějšímu pohybu dojde, pokud přidáme vnější síly (zejména od Měsíce a Slunce, ale částečně též od planet) – ty způsobí, že osa rotace se začne pohybovat

i v prostoru (tj. vůči hvězdám). Tento pohyb má jednak složku postupnou (zvanou precese), jednak periodickou (nutace). Precese se projevuje tím, že osa rotace se v prostoru pohybuje velice pomalu po plášti kužele, jehož osa je kolmá k rovině ekliptiky. Perioda tohoto pohybu se rovná přibližně 26 tisíc let (tzv. platónský rok), úhel mezi oběma osami je stálý a je roven sklonu ekliptiky (cca 23,5 stupně). Precese způsobuje postupné zvětšování ekliptikálních délek hvězd zhruba o 50" za rok. Nutace způsobí, že skutečná poloha osy rotace se periodicky otáčí kolem této střední polohy, takže pól rotace opisuje v prostoru mírně zvlněnou křivku. Jde přitom o celou řadu eliptických pohybů o periodách od několika dní až po řadu desítek let; hlavní člen má periodu zhruba 18,6 roku a amplitudu 9,2" ve sklonu ekliptiky a 6,8" v ekliptikální délce. Kromě toho způsobují vnější síly též velice malý kvaziperiodický pohyb osy rotace uvnitř tělesa. Tento pohyb (tzv. Oppolzerovy členy) probíhá v záporném směru, má zhruba jednodenní periodu a jeho amplituda závisí na vzájemné poloze Slunce a Měsíce vůči Zemi. Mění se proto zhruba v intervalu od 0,00" do 0,02"; maxima nabývá při úplňku a novu, minima při první a poslední čtvrti Měsíce.

Země však není zcela přesně rotačně symetrická – je mírně zploštělá též v rovině rovníku. Tato skutečnost (ve spojení s vnějšími silami) se projevuje hlavně v krátkoperiodických změnách rychlosti její rotace, o periodě okolo 12 hodin a amplitudě, která se opět mění v závislosti na vzájemné poloze Slunce a Měsíce. Odpovídající kolísání světového času je v oblasti desítek mikrosekund.

Další komplikace způsobí elasticita zemského pláště a přítomnost tekutého jádra;



tyto komponenty reagují jednak na vnější síly (slapové deformace), jednak na změny polohy osy rotace v tělese (rotační deformace). Země jako celek se deformuje, a tím se mění i jednotlivé složky jejího momentu setrvačnosti. Je proto nutné počítat nikoliv s konstantním, ale proměnlivým tenzorem setrvačnosti Země. Základní rovnice popisující rotaci netuhé Země se nazývají Liouvilloy. Netuhost zemského tělesa (včetně oceánů) se projeví hlavně v prodloužení periody volného pohybu osy rotace v tělese na 435 dní (tzv. Chandlerova perioda, podle autora jejího prvního určení z pozorování), zanedbatelné nejsou ani změny amplitud jednotlivých členů nutace oproti řešení pro tuhou Zemi, závisící na frekvenci pohybu. Změny amplitud jsou největší zejména v blízkosti rezonance, způsobené přítomností tekutého jádra (to se projevuje další volnou frekvencí pohybu osy rotace v tělese o periodě 23h 53min, čemuž odpovídá 460 dní v prostoru). Částečná viskozita pláště způsobuje malé fázové posuny jednotlivých nutačních členů a postupné tlumení amplitudy volného pohybu pólu. Slapové tření pak způsobuje postupné brždění rotace, doprovázené pomalým vzdalováním Měsíce od Země o cca 3 cm za rok (to je způsobené nutností zachování celkové hybnosti soustavy Země-Měsíc). Slapové deformace jsou doprovázeny periodickými změnami axiálního momentu setrvačnosti Země, odkud zase vyplývají změny rychlosti její rotace o periodách od několika dní do desítek let (jsme zde svědky téhož jevu, který známe

### Ing. Jan Vondrák, DrSc. (\*1940)

vystudoval FSv ČVUT, obor geodetická astronomie, zabývá se astrometrií, studiem rotace Země a výpočty astronomických eferid v oddělení dynamické astronomie ASÚ AV ČR. Zajímá se o vážnou hudbu a turistiku.

dobře ze sportu – při piruetě se při rozpažení krasobruslařky zvětší její moment setrvačnosti a její rotace se zpomalí, a naopak při upažení se rotace zrychlí). Nejvýraznější odpovídající změny světového času jsou v dlouhoperiodické oblasti, kde nepravidelnosti o periodě 18,6 roku dosahují až 164 milisekund.

Řešení se ještě dále zkomplikuje, uvažujeme-li existenci oceánů. Ty na slapové síly reagují na různých místech Země dosti rozdílně, vzhledem k nepravidelným pobřezím a různým hloubkám vody. To se pak projevuje především krátkoperiodickými (o periodách jeden den a kratších) změnami jak v pohybu pólu, tak rychlosti rotace.

Situace je zjednodušeně znázorněna na Obr. 1. Velice obecně můžeme říci, že vnější síly (od okolních nebeských těles) ovlivňují především pohyb osy rotace v prostoru, zatímco vnitřní přesuny hmot (na Zemi a jejím povrchu) dominantně působí na pohyb osy rotace vůči zemskému tělesu. Vlastní rychlost rotace je pak ovlivňována oběma zdroji poruch.

Hlubavému čtenáři jistě neunikl ten fakt, že k definici orientace třírozměrného tělesa v prostoru v zásadě postačí tři úhly, zatímco zde jsme zatím hovořili vlastně o pěti. Je tomu opravdu tak; tento zdánlivý rozpor vysvětluje existence „nadbytečné“ osy rotace Země, která není pevně spojena ani s jednou souřadnicovou soustavou. V principu bychom ji mohli zcela vynechat, a sledovat např. pouze pohyb osy maximálního momentu setrvačnosti (nebo i jiné osy pevně spojené se Zemí) v prostoru. To by však situaci značně zkomplikovalo, neboť pohyb takové osy by byl velice složitý, v podstatě nepředvídatelný a navíc bychom se ochdili o znalost polohy osy rotace.

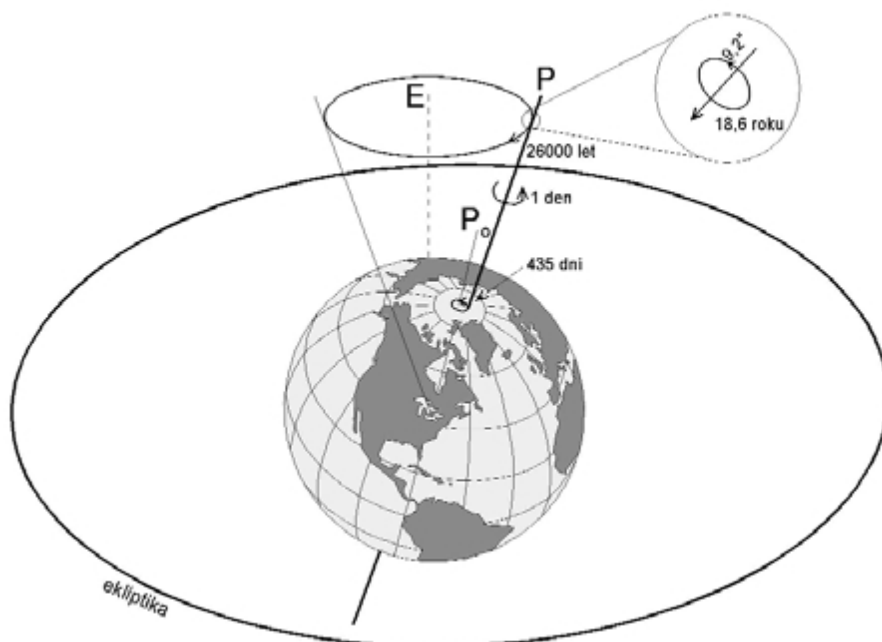
Ideální osou však není ani osa okamžité rotace – ta totiž vykonává v obou souřadnicových soustavách sice malý, ale dnes již dobře měřitelný pohyb o jednodenních a kratších periodách. V minulosti byla řada těchto krátkoperiodických pohybů zcela zanedbávána, protože byla pod hranicí přesnosti pozorování, uvažovány byly pouze Oppolzerovy členy. Praktické důvody vedly IAU v roce 1979 k přijetí tzv. *Celestial Ephemeris Pole*, který je rotačnímu pólu velice blízký a za zjednodušujících předpokladů nevykonává krátkoperiodický jednodenní pohyb ani v jedné ze soustav. Od té doby se však jednak podstatně zpřesnila

pozorování, jednak pokročily teoretické výzkumy, a tak v roce 2000 rozhodla Mezinárodní astronomická unie (IAU) o přijetí nové definice, s platností od 1. 1. 2003. Nový *Celestial Intermediate Pole* (CIP) je definován tak, že v nebeském systému je dán vynuceným pohybem tzv. Tisserandovy střední osy zemského tělesa s periodami delšími nežli 2 dny. K němu je také vztažen nově přijatý teoretický model precese a nutace, nazvaný IAU 2000. Všechny ostatní pohyby tohoto pólu (včetně krátkoperiodických) se pak interpretují jako pohyb pólu v tělese a určují se z pozorování. CIP tak vykonává v prostoru pouze dlouhoperiodický pohyb, zatímco jeho pohyb v zemském tělese obsahuje i složky krátkoperiodické.

### Co nám říkají o rotaci Země pozorování?

Každý teoretický model, je-li konfrontován se skutečností, dříve či později narazí na určité rozpory. Odhalování jejich příčin pak vede k dalšímu vylepšování modelu. Nejinak je tomu i s rotací Země – postupné zpřesňování pozorování parametrů orientace Země během staletí vedlo postupně od jednoduchých modelů tuhé Země ke stále komplikovanějším modelům, nevyhnutelně spojeným i se stále složitějšími matematickými řešeními. Snahou je přitom použití takového modelu, který na jedné straně

uspokojivě vyhovuje geofyzikálním modelům vnitřní stavby Země, jednak s dostatečnou přesností vyhovuje astronomickým pozorováním. Shora jsme jen letmo takový vývoj naznačili. Žádný model však nikdy není schopen popsat daný jev beze zbytku. V případě rotace Země je poměrně dobře znám pohyb všech okolních těles Sluneční soustavy, a proto je možné vypracovat velice přesnou teorii precese a nutace. Podstatně problematičtější je však pohyb pólu a rychlost vlastní rotace, neboť geofyzikální vlivy, které je ovlivňují, jsou natolik komplexní a v podstatě nepředvídatelné, že není možné vypracovat dostatečně přesný model, použitelný pro predikci těchto jevů na delší dobu. Existuje proto Mezinárodní služba rotace Země (IERS), která parametry orientace Země pravidelně monitoruje. Byla založena společně Mezinárodní astronomickou unií a Mezinárodní unií geodetickou a geofyzikální (IUGG) a nahradila tak od roku 1988 Mezinárodní časové byro (BIH) a Mezinárodní službu pohybu pólu (IPMS), které se této problematice věnovaly předtím. Zatímco obě původní služby (BIH, IPMS) používaly téměř výhradně metody klasické optické astrometrie (tj. v podstatě sledování pohybu místních tížnic jednotlivých observatoří mezi hvězdami), IERS využívá moderní kosmické metody pozorování. K nim patří metoda rádiové interferometrie z velmi



Obr. 1. Změny orientace Země v prostoru. E – je pól ekliptiky, P – pól okamžité rotace,  $P_0$  – jeho střední poloha.

dlouhých základen – VLBI (pozoruje se orientace mezikontinentálních základen tvořených radioteleskopy vůči extragalaktickým zdrojům rádiového záření), metoda laserového pozorování Měsíce a umělých družic (z transitsního času odraženého laserového pulsu se určují vzdálenosti pozorovaného objektu) a metoda Globálního polohového systému – GPS (zde se v podstatě určují opět vzdálenosti k jednotlivým družicím, vysílajícím rádiové signály). Věnujme se výsledkům těchto pozorování podrobněji.

### Vlastní rotace Země

Otáčení Země okolo její okamžité osy rotace měříme prostřednictvím tzv. světového času (UT). I když je tato veličina z tradičních důvodů nazývána časem, jde vlastně o hodinový úhel fiktivního středního Slunce vůči nultému poledníku (vyjádřený v časové míře), zvětšený o 12 hodin. Fiktivní střední Slunce je pojem, zavedený na konci devatenáctého století Newcombem, který v podstatě označuje polohu hypotetického Slunce, které se pohybuje v rovině zemského rovníku rovnoměrně vůči hvězdám. Toto ovšem není zcela přesná současná definice světového času, spíše jeho názorné vysvětlení. Ve skutečnosti se v současnosti světový čas odvozuje z přímo astronomicky měřitelného greenwichského hvězdného času (což je hodinový úhel jarního bodu na nultém poledníku) přepočtem pomocí poměrně jednoduchého konvencionálně přijatého vztahu; ten je pak volen tak, aby UT

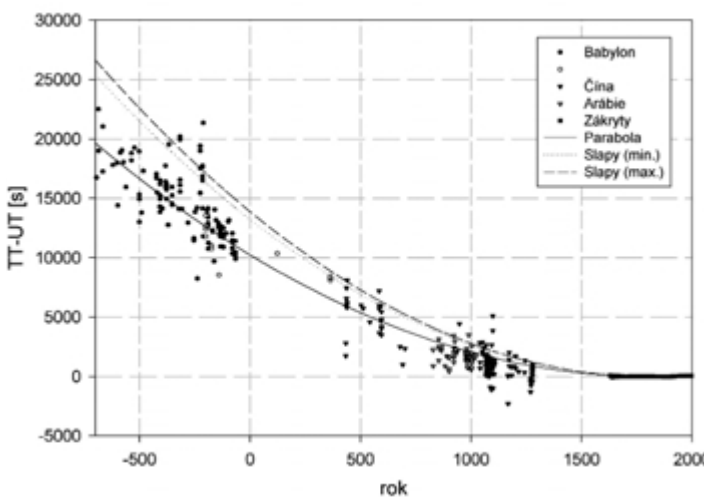
s poměrně vysokou přesností odpovídal právě shora podanému popisu. Celosvětovou koordinací astronomických pozorování světového času bylo od roku 1911 pověřeno Mezinárodní časové byro (BIH), jehož původním cílem bylo určovat odchylky jednotlivých rádiových časových signálů od UT.

Pro určení nepravidelnosti rychlosti rotace Země se takto určený čas porovnává s rovnoměrnou časovou škálou, definovanou prostřednictvím podstatně stabilnějších procesů nežli je rotace Země. K tomu v minulosti sloužil v astronomii především tzv. eferimodový čas ET (zavedený IAU v roce 1952), definovaný jakožto nezávisle proměnná veličina v teorii pohybu Země kolem Slunce. Za jeho jednotku byl zvolen určitý zlomek tropického roku 1900 tak, aby sekunda ET odpovídala sekundě UT té doby, a počátek odpovídá zhruba času UT na počátku století. V roce 1955 byly zkonstruovány první cesiové atomové hodiny, jejichž prostřednictvím je od roku 1967 definována mezinárodní jednotka času – sekunda SI. Ta byla zvolena tak, aby se rovnala s nejvyšší možnou přesností jednotce času ET. Na jejím základě je vytvářena mezinárodní časová stupnice TAI (Mezinárodní atomový čas), jejíž počátek byl stanoven tak, aby byl 1. 1. 1958 o světové půlnoci totožný se světovým časem UT. Rozdíl mezi oběma časovými škálami (ET-TAI) je proto prakticky konstantní – z pozorování byl stanoven na 32,184 sekundy. V roce 1992 byly IAU zavedeny nové časové stupnice, konzistentní

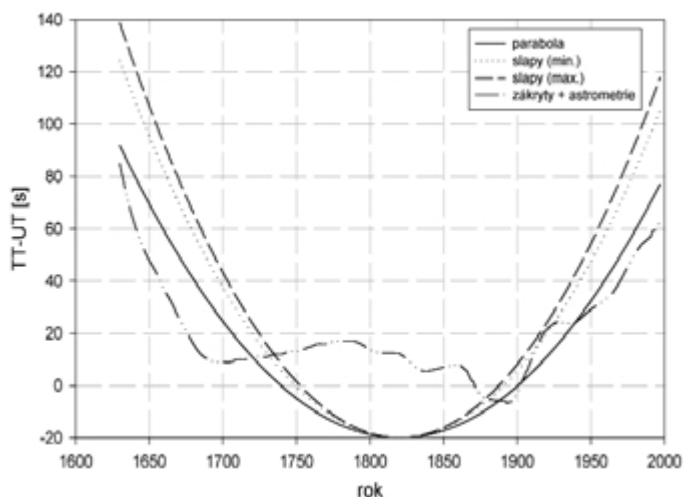
s obecnou teorií relativity; barycentrický souřadnicový čas (TCB), geocentrický souřadnicový čas (TCG) a terestrický čas (TT). Z nich ten poslední je roven TAI+32,184s a je v astronomii používán jako argument zdánlivých geocentrických poloh nebeských těles. Prakticky tedy navazuje bez skoku či změny chodu na ET. Máme proto k dispozici víceméně rovnoměrnou časovou škálu po celou historii astronomických pozorování, i když v různých epochách definovanou na základě zcela rozdílných principů a realizovanou s podstatně odlišnou mírou přesnosti odečtu.

V souladu s pozorovacími technikami té které doby a časovou stupnicí, která v daném období je k dispozici, se k měření rotace Země využívají pozorování nejrůznějšího charakteru. Zde se omezíme pouze na pozorování čistě astronomická a nebudeme se zabývat takovými jevy, jako jsou např. rytmy růstu některých fosilních organismů (korálů, stromatolitů, měkkýšů a pod.), jejichž pomocí lze sledovat délku dne v hrubých obrysech zpětně po dobu až 2–3 miliard let. Konstatujeme pouze, že tyto údaje v podstatě potvrzují velikost zpomalování rotace Země, získanou z astronomických pozorování, a to i pro velmi vzdálené epochy. Celou historii astronomického sledování rotace Země můžeme zhruba rozdělit do tří období:

a) Pozorování prostým okem před vynálezem dalekohledu, tj. zhruba v letech od -700 do +1600. V tomto období lze prakticky využít pouze pozorování zatmění Slunce



Obr. 2. Rozdíl mezi rovnoměrným terestrickým časem TT a rotačním světovým časem UT, určený od 7. století př. Kr. dodnes z pozorování zatmění Slunce a Měsíce, zákrytů hvězd Měsícem, optickou astrometrií a VLBI.



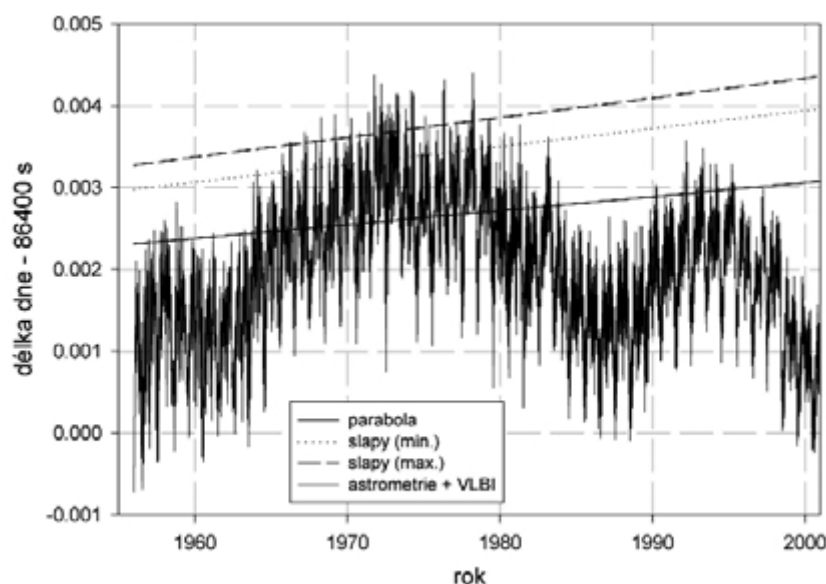
Obr. 3. Rozdíl mezi TT a UT, určený pouze z teleskopických pozorování (zákryty, optická astrometrie, VLBI).

a Měsíce. Informace se opírají především o archivní záznamy, pocházející z Babylonu, Číny, Arábie a Řecka. Zřejmě nejdůkladnější zpracování těchto záznamů provedl F. R. Stephenson ve své knize *Historical Eclipses and Earth's Rotation* (Cambridge University Press, 1997), odkud byly převzaty zde použité údaje.

b) Pozorování dalekohledy před zavedením atomového času, tj. zhruba v letech 1600–1955. Zde jsou hlavním zdrojem informací pozorování zákrytů hvězd Měsícem. Výsledky zpracování těchto pozorování publikovali např. F. R. Stephenson a L. V. Morrison (Phil. Trans. R. Soc. Lond. A313, 1984, 47–70).

c) Pozorování metodami optické astrometrie a od osmdesátých let rádiovou interferometrií z velmi dlouhých základen (VLBI), tj. od roku 1956 dodnes. Světový čas UT je přímo či nepřímo (prostřednictvím časových signálů) vztažen k atomovému času TAI. Globální zpracování pozorování světového času optickou astrometrií za léta 1956,0–1992,0 v systému katalogu Hipparcos bylo nedávno provedeno v AsÚ AV ČR, výsledky odvozené z pozorování kosmickými technikami jsou pravidelně publikovány Mezinárodní službou rotace Země (IERS).

Pozorované hodnoty TT-UT v sekundách jsou znázorněny na Obr. 2, kde parabola proložená všemi pozorováními je znázorněna plnou čarou, tečkovaná a čárkovaná čára odpovídají minimálnímu a maximálnímu odhadu slapového zpomalování rotace Země. Jak už bylo shora naznačeno, slapové zpomalování rotace Země je doprovázeno urychlováním Měsíce ve dráze a s tím spojeným jeho postupným vzdalováním od Země. Slapových vlivů v pohybu Měsíce si všiml již Halley v roce 1695, později je v 18. století studoval Laplace a jejich vliv na rotaci Země předpokládal na konci 19. století George Darwin (syn známého Charlese Darwina). Observačně bylo však zpomalování rychlosti rotace (spolu s tzv. dekadovými změnami) potvrzeno až v první polovině dvacátého století De Sitterem a Spencer-Jonesem. Konstantní rychlosti rotace by odpovídala libovolně skloněná přímka (její sklon by vypovídal pouze o rozdílně zvolené jednotce obou časů), parabolický průběh pak svědčí o rovnoměrném zpomalování rotace. I přes značný rozptyl výsledků po většinu sledovaného období je zřejmé, že skutečné zpomalování rychlosti



Obr. 4. Odchyška pozorované délky dne od její nominální hodnoty (86400 sekund), určená z pozorování optickou astrometrií a rádiovou interferometrií z velmi dlouhých základen.

rotace je systematicky poněkud menší, nežli by odpovídalo pouze slapovému tření. K témuž závěru nutně dojdeme i při pohledu na Obr. 3, který představuje zvětšenou část grafu z období pouze teleskopických pozorování (a tedy i výrazně větší přesnosti pozorování). Zde je možné již sledovat nejenom sekulární změny, ale též nepravidelné změny v oblasti period o desítkách až stovkách let. Ani v tomto měřítku však nejsou ještě dobře viditelné změny o kratších periodách a mnohem menších amplitudách, které jsou díky dalšímu zpřesnění pozorování po roce 1956 dobře měřitelné.

Ty vyniknou teprve v grafu na Obr. 4, kde je pro větší názornost zobrazena odchyška délky dne od její nominální hodnoty 86400 sekund, vypočtená jako časová změna TT-UT v sekundách za den (tj. derivace této veličiny podle času). Konstantní rychlosti rotace by zde odpovídala vodorovná přímka, rovnoměrnému zpomalování pak přímka skloněná. V grafu jsou pro srovnání, spolu s hodnotami určenými z pozorování, zobrazeny též přímky, odpovídající parabolám z Obr. 2 a 3; plnou čarou přímka proložená pozorovanými hodnotami v celém sledovaném období, tečkovaně a čárkovaně hodnoty odpovídající minimálnímu a maximálnímu odhadu teoretického slapového zpomalování rotace. Z obrázku je patrný nejenom postupný růst délky dne (o poněkud nižší hodnotě, nežli by odpovídalo slapovému tření), ale i na něm namodulo-

vané nepravidelné dlouhoperiodické změny. Ty mohou někdy dokonce způsobit i dočasné urychlení rotace, které se v grafu projevuje zkrácením délky dne. Zvláště výrazné jsou pak změny sezónní o půlroční a roční periodě, částečně jsou viditelné též mnohem menší krátkoperiodické fluktuace s periodami v oblasti desítek dní.

Skutečnost je tedy dosti odlišná od teoretického řešení. Především zřejmě nestačíme s pouhým slapovým třením; tomu by odpovídal růst délky dne zhruba o 0,0023 sekundy za století, zatímco astronomická pozorování za uplynulých 2700 let naznačují prodloužování délky dne poněkud menší – o 0,0017 sekund za století. Rozdíl je možné celkem spolehlivě připsat velice pomalému zmenšování zploštění Země, způsobenému reakcí viskózně-elastické Země na poslední odlednění, které způsobilo snížení zatížení zemské kůry ledovci blízko pólů. Při zachování celkové hmotnosti Země se při zmenšeném zploštění zmenší též její axiální moment setrvačnosti, a při zachování momentu hybnosti se tedy nutně zvětší rychlost rotace. Změna zploštění, která byla zjištěna z laserových pozorování umělých družic Země v uplynulých dvaceti letech, odpovídá velikostí právě zjištěnému rozdílu ve zpomalování rychlosti rotace Země.

Změny o periodách v oblasti desítek let jsou poměrně těžko vysvětlitelné. Některé z nich je možno částečně připsat zonálním větrům v atmosféře (šestiletý cyklus) nebo

sluneční činnosti (jedenáctiletý cyklus). Ostatní změny jsou velmi pravděpodobně způsobeny vzájemným působením tekutého jádra a viskózně-elastického pláště Země (topografickým nebo geomagnetickým) a přesuny hmot na jejich rozhraní; tyto variace však stále ještě čekají na spolehlivé vysvětlení. Fluktuační periody kratších nežli cca dva roky jsou naopak naprosto spolehlivě vysvětleny kombinovaným působením slapových deformací zemského pláště i oceánů (vlivem kterých dochází k periodickým změnám momentu setrvačnosti Země) a přesunů vzdušných hmot v atmosféře. Zde hrají dominantní roli sezónní, tzv. zonální větry ve směru západ-východ, které jsou rozloženy vůči rovině rovníku nesymetricky.

### Pohyb pólu

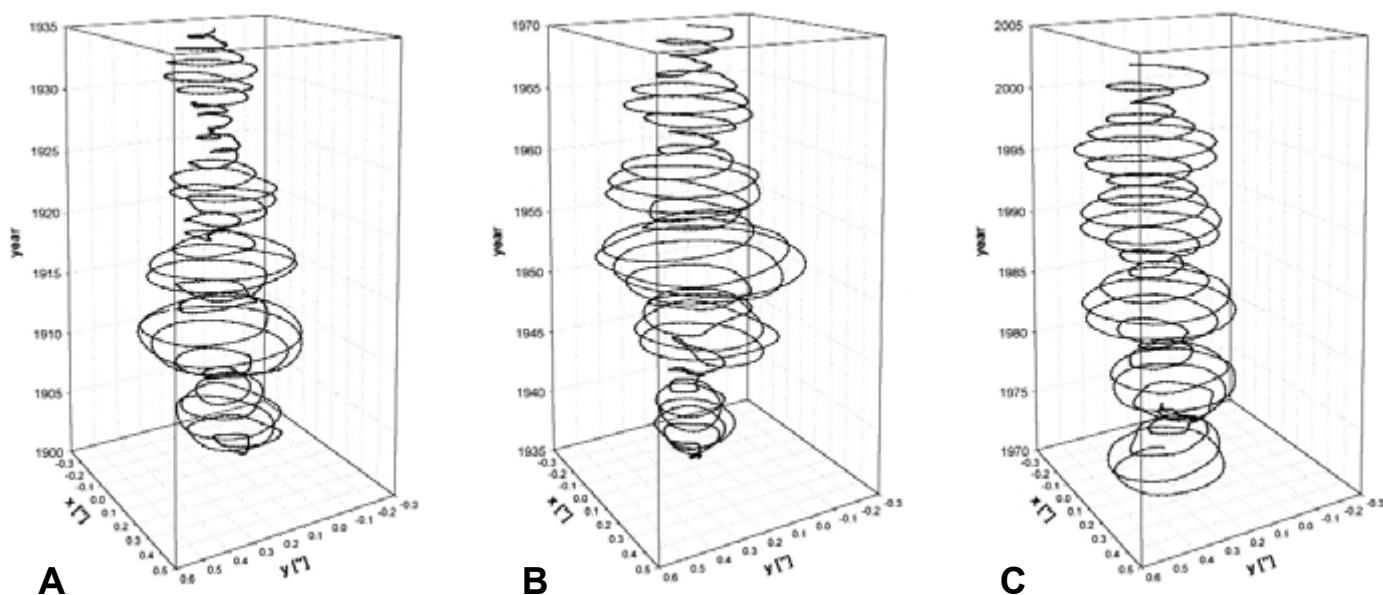
Pohyb pólu, ačkoliv teoreticky předpovědaný již v 18. století Leonhardem Eulerem, byl experimentálně ověřen až na konci devatenáctého století. Projevuje se mj. změnami zeměpisných šířek; prvním pozorovatelem tohoto jevu byl v letech 1884–1885 berlínský astronom Friedrich Küstner, k němuž se později svými pozorováními v pražském Klementinu (v letech 1889–1892 a 1895–1899) připojil též Ladislav Weinek. V roce 1891 do té doby neznámý americký astronom, Seth Carlo Chandler, porovnal svá vlastní pozorování na Harvardské observatoři s Küstnerovými a došel k závěru, že

perioda tohoto pohybu je podstatně delší nežli předpokládal Euler – 14 měsíců namísto 10 předpokládaných. Tato perioda proto dodnes nese právem jeho jméno. Poněkud později též dospěl k závěru, že kromě této složky existuje ve změnách zeměpisné šířky ještě další, o roční periodě. Krátce nato (v roce 1899) byla pro sledování tohoto jevu založena Mezinárodní šířková služba (ILS) se šesti stanicemi (Ukiah, Cincinnati, Gaithersburg, Carloforte, Tschardjui a Mizusawa) rozloženými na téže rovnoběžce o šířce  $39^{\circ} 8'$  a pozorujícími tytéž hvězdy přístroji stejného typu (vizuálními zenitteleskopy). Později se postupně začaly přidávat k tomuto projektu další observatoře, až v roce 1962 vznikla Mezinárodní služba pohybu pólu (IPMS) o mnoha desítkách globálně rozložených stanic, disponujících astrometrickými přístroji nejrůznějších typů. Ta byla nahrazena v roce 1988 již zmíněnou Mezinárodní službou rotace Země (IERS).

Výsledky všech těchto pozorování jsou souhrnně uvedeny na Obr. 5A, B, C. Na nich čas probíhá podél svislé osy zdola nahoru, souřadnice pólu rotace  $x$ ,  $y$  na vodorovných osách jsou měřeny v obloukových vteřinách ve směru nultého poledníku ( $x$ ) a 90. západního poledníku ( $y$ ). Jde vlastně o dvě složky úhlu, svíraného mezi osou rotace Země a konvencionálně přijatým počátečním směrem, který byl ztotožněn se střední polohou

osy rotace na počátku dvacátého století. Dodejme ještě, že úhlu  $1''$  odpovídá asi 30 m na zemském povrchu; poloha okamžitého pólu se tedy nikdy nevzdaluje od své střední polohy na zemském povrchu o více nežli 15 metrů. Řešení v letech 1900–1976 pochází plně z pozorování metodami optické astrometrie a bylo nedávno získáno kolektivem pracovníků AsÚ AV ČR a Stavební fakulty ČVUT, kteří pod vedením autora tohoto článku nashromáždili téměř pět milionů pozorování v intervalu 1899,7–1992,0 na 33 observatořích a zpracovali je v systému katalogu Hipparcos. V intervalu let 1976,0–1992,0 je vynesena kombinace tohoto řešení s pozorováními kosmickými metodami (nejprve VLBI, později s postupně narůstající vahou družicových metod), a od roku 1992,0 do konce sledovaného intervalu již jde výhradně o určení moderními kosmickými metodami. Pohyb pólu je vyznačen plnou čarou, malé kroužky na ní jsou vyneseny v desetidenních intervalech.

Rozdíly od teoretického řešení jsou evidentní. Předně je vidět, že střední poloha pólu se postupně přesouvá směrem doleva – podrobná analýza této složky ukazuje, že pól vykonává sekulární pohyb zhruba směrem 77. západního poledníku o cca  $0,3''$  za století. Tato složka je patrně malou částí pohybu o mnohem delší periodě (řádu desítek tisíc let) a je způsobena globálními přesuny hmot na Zemi (pravděpodobně nesymetricky



Obr. 5. Pohyb pólu v průběhu dvacátého století, určený z pozorování optickou astrometrií a od r. 1976 moderními kosmickými metodami: A) v letech 1900–1935, B) v letech 1935–1970, C) v letech 1970–2001.

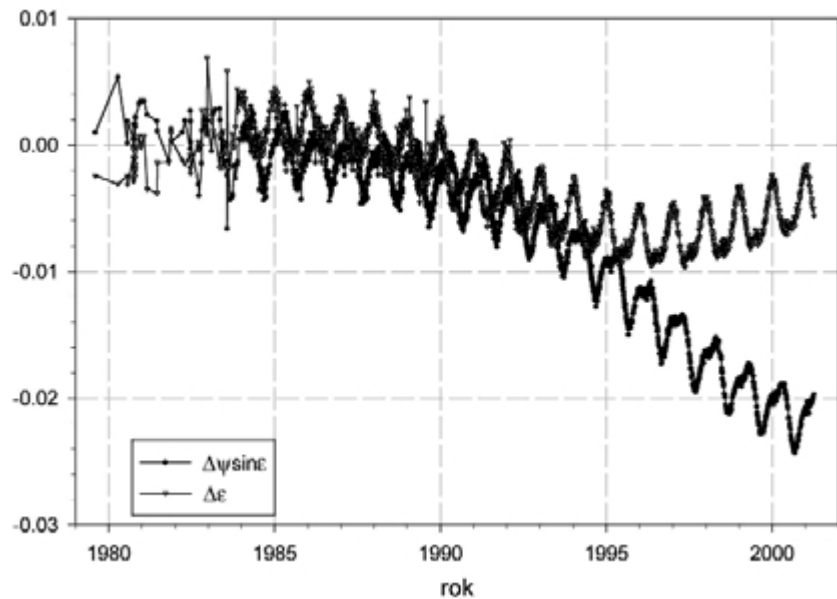
kým odledňováním polárních oblastí po poslední době ledové). Kromě toho lze spektrální analýzou nalézt dlouhoperiodické variace, z nichž nejvýraznější jsou ve tvaru velice protáhlých elips o amplitudách 0,04" a 0,02" a periodách zhruba 76 a 26 let (z nichž ta druhá se nazývá se Markowitzovou smyčkou podle svého objevitele). Řada autorů však zastává názor, že tyto složky pohybu pólu jsou pouhým artefaktem, způsobeným systematickými chybami pozorování.

Nejvýraznějším jevem je však pohyb po víceméně pravidelně se zavíjející a rozvíjející spirále. Spektrální analýza ukazuje, že je to způsobeno interferencí dvou nejvýraznějších složek – volného Chandlerova pohybu o periodě cca 14 měsíců a pohybu o roční periodě. Teoretická řešení pro modely Země (bez oceánů a atmosféry) přitom připouštějí pouze první z nich. Na rozdíl od teoretického řešení (perioda by měla být konstantní a amplituda by se měla zvolna zmenšovat) není volná Chandlerova složka příliš stabilní – především její amplituda velice a nepravidelně kolísá. Absolutního minima dosáhla v letech 1925–1940 (cca 0,05"), maxima pak v letech 1950–1955 (cca 0,25"). Jde o prakticky kruhový pohyb v kladném smyslu (tj. ve směru rotace Země, proti směru hodinových ručiček). V období minimální amplitudy pak došlo navíc k velice rychlé změně fáze tohoto pohybu, kterou lze též interpretovat jako změnu jeho periody. I když vážným adeptem na původce těchto odchylek od teorie je oceán, nejsou dodnes spolehlivě vysvětleny – není objasněn ani mechanismus, který čas od času amplitudu této složky znovu vybudí, ani ten, který je schopen měnit její fázi či periodu.

Roční pohyb, který pól vykonává stejným směrem po mírně eliptické dráze (její velká poloosa směřuje zhruba ke 30. západnímu poledníku) je naproti tomu relativně stálý; jeho amplituda sice mírně kolísá, ale nachází se stále poblíž hodnoty 0,1". Je vynucen především sezónními změnami momentu hybnosti zemské atmosféry (změny tlaku a vítr působí na nepravidelná zvlnění zemského povrchu), zanedbatelný však není ani vliv oceánů. Tytéž vlivy způsobují i mnohem menší a nepravidelné pohyby pólu v krátkoperiodické oblasti.

### Precese a nutace

Jak již bylo řečeno shora, pohyb osy rotace Země v prostoru rozdělujeme (víceméně



Obr. 6. Odchytky nebeského pólu v délce ( $\Delta\psi$ ) a ve sklonu ekliptiky ( $\Delta\epsilon$ ) v obloukových sekundách od dosud platného modelu precese a nutace, určené z pozorování VLBI.

uměle, protože jsou obě způsobeny stejnými silami) do složky postupné a periodické, které se nazývají precese a nutace. Zatímco precesi znal již Hipparcos ve druhém století před Kristem, nutace byla observačně objevena mnohem později. Objevil ji až v 18. století Bradley, který se pokoušel určit roční paralaxy hvězdy  $\gamma$  Draconis. Namísto paralaxy však našel roční aberaci a později i nutaci. Poněvadž je tento pohyb dán dominantně (nikoliv však výhradně) vnějšími silami, je podstatně lépe modelovatelný nežli vlastní rotace a pohyb pólu. Zatímco rychlost precese je dána (kromě již zmíněných vnějších sil a rychlostí rotace) pouze tzv. dynamickým zploštěním Země, jednotlivé členy nutace jsou navíc ovlivňovány vnitřní stavbou Země (určitou roli hraje celá řada faktorů, dominantní je elasticita pláště a zploštění tekutého jádra). Vývoj teoretických modelů nutace proto jde ruku v ruce s geofyzikálními výzkumy, přičemž některé geofyzikální parametry globálního charakteru se často určují z astronomických pozorování. Tyto modely se nemění příliš často; ke změně dochází vždy až po několika desetiletích nashromážděných pozorování, jejichž statisticky významné odchylky od teorie si vynutí přijetí přesnějšího modelu. Jako ilustraci uvádíme na Obr. 6 odchylky pozorování VLBI od modelu precese a nutace, který v současnosti stále ještě platí. Tyto odchylky nedávno vedly IAU

k poslední změně modelu, která nabude platnosti 1. 1. 2003.

V průběhu uplynulého století se tak postupně přešlo od původní jednoduché Newcombovy teorie z konce 19. století nejprve k teorii Woolardově (1953), založené na tuhém modelu Země a vnějších silách od Měsíce a Slunce (obsahující 69 periodických členů), poté k teorii Wahrově (1980), založené na netuhém geofyzikálním modelu Země Gilberta a Dziewonského 1066A (jde v podstatě o model s tekutým zploštělým jádrem a stratifikovaným elastickým pláštěm, bez atmosféry a oceánů) a vnějších silách od Měsíce a Slunce, obsahující 106 členů, až k nedávno přijaté teorii, vypracované Mathewsem, Herringem a Buffetem (2000). Ta obsahuje celkem 1360 členů a je založena na velice složitém modelu Země a vnějších silách (kromě Měsíce a Slunce) též od planet. Použitý model Země obsahuje k již dříve uvažovaným vlivům navíc též vliv vnitřního tuhého jádra, vzájemného elektromagnetického působení jádra a pláště a zahrnuje rovněž neelastické parametry pláště a vliv oceánů. Řada parametrů tohoto modelu byla určena tak, aby výsledný model precese-nutace co nejlépe vyhovoval pozorováním VLBI. Přesnost těchto teorií se tak zvýšila během právě uplynulého století o více než dva řády – z 0,1" pod 0,001".