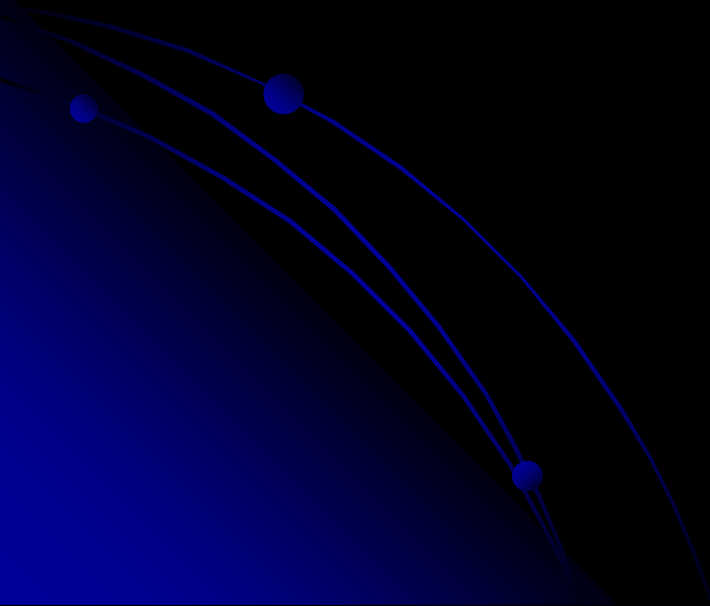


základy astronomie a astrofyziky

rotace Země, precese, nutace,
aberrace, refrakce



4.1 Rozměry Země

První historická měření rozměru Země vycházela z Eratosthénovy metody, která svazovala úhel mezi dvěma body na povrchu a vzdálenost, která je mezi nimi. Takto určili již Arabové délku 1° mezi 111,7–113,3 km. První novodobá měření podobnou metodou provedl v roce 1528 J. Fernel (1497—1558), který pomocí otáček kola na povrchu stanovil délku tzv. Pařížského poledníku mezi Paříží a Amiens.

Od této metody se postupně přešlo k přesnější metodě triangulační. Na povrchu Země se vytýčily body, pro které platilo, že nejbližší mezi sebou byly viditelné. Měřením úhlů a vzdáleností mezi nimi se pak postupně proměřovaly jednotlivé trojúhelníky, které měly strany cca. mezi 30–40 km (příklad je na obrázku 56). Od roku 1669 proběhlo měření napříč celou Francií, bylo zjištěno, že 1° měří různě. Vysvětlení je prosté, Země není ideální koule, ale směrem k pólům se více projeví její zploštění. Teoretické odvození provedl Isaac Newton kolem roku 1686, příčina zploštění Země tkví v její rotaci. Další měření provedená v Laponsku a v Peru pak toto tvrzení jen potvrdila. Na základě těchto měření pak byla definována jednotka 1 m jako $1/10000000$ poledníkového kvadrantu Země.

Mezi roky 1733–1740 Jacques (1677—1756) a jeho syn César (1714—1784) Cassiniové uskutečnili první triangulaci celé Francie včetně přepočtení délky jednoho stupně meridiánu, což vedlo v roce 1745 k publikaci první mapy Francie na rigorózních základech.

Ve Francii byl také metr uznán jako oficiální délková míra v roce 1799, v Rakousko-Uhersku se tak stalo až v roce 1876. Prototyp metru je umístěn v Sèvres u Paříže. V současné době je metr definován pevně stanovenou hodnotou rychlosti světla ve vakuu, kterou toto světlo urazí během časového intervalu $1/299792458$ sekundy.

Dnešní geodetická měření se provádějí pomocí družic Země. Měření jsou mnohonásobně přesnější než pomocí trigonometrické sítě, získáváme velmi podrobně

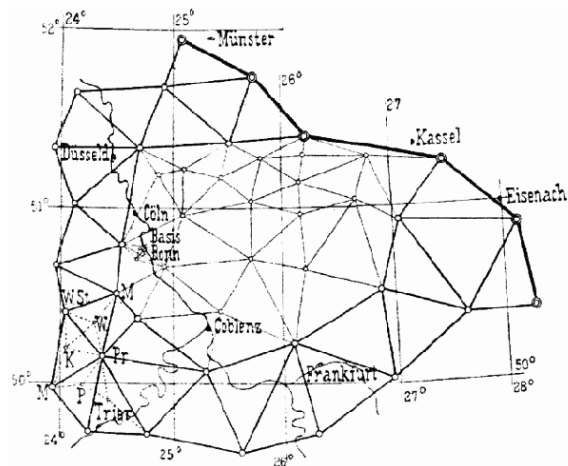


Fig. 4. Die rheinisch-hessische Kette und das nieder-rheinische Dreiecksnetz.

Obrázek 56: Historická mapa Německa z 19. století se znázorněnými triangulačními body v oblasti Porýnf-Hesenska [E21].

informace o tvaru, rozměrech Země a také o rozložení hmoty v ní. To vše je možné díky přímým pozorováním a měřením vzdáleností pomocí laserových odražečů či rádiových měření, relativních rychlostí určených z Dopplerova posuvu, interferometrických měření a altimetrů z družic.

Přesnou definicí trajektorie družic o pohybu po ní nám umožňují speciální geodetické družice, které jsou schopny potlačit negravitační poruchy, což nám pak umožňuje zjistit přesný potenciál Země.

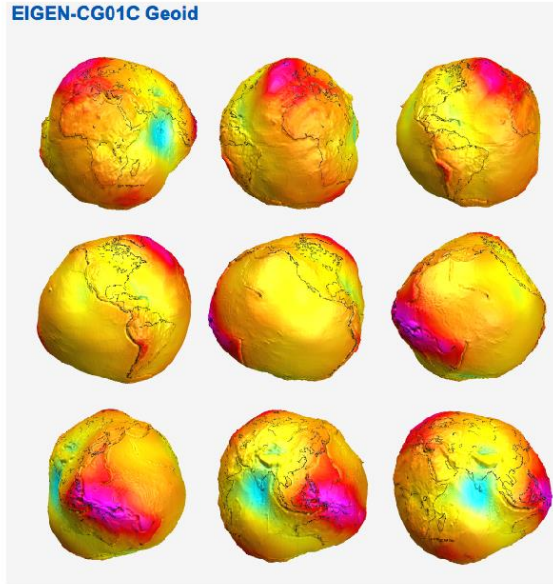
4.2 Tvar Země

Snaha o popsání tvaru Země naráží na složitou aproximaci velmi členitého zemského povrchu tělesem jednodušších vlastností. Realizace ekvipotenciální plochy nejtěsněji přiléhající ke střední klidné hladině moří a oceánů, ke které se vztahuje tzv. nadmořská výška, je tvarem velice komplikovaným pro praxi. Tato plocha reprezentuje tzv. *geoid* (obr. 57). Pro praktické potřeby se zavádí zjednodušení, kterého se využívá v astronomii a kartografii.

Prvním jednodušším modelem tvaru Země je *rotační elipsoid*, který lze ve válcových souřadnicích se středem v centru Země popsat vztahem

$$\left(\frac{\rho}{a}\right)^2 + \left(\frac{z}{b}\right)^2 = 1, \quad (192)$$

kde $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$ je vzdálenost od osy otáčení, a je rovníkový poloměr a b poloměr



Obrázek 57: Geoid - tvar Země, výškové rozdíly jsou schválně zvětšeny, aby byly viditelné [E22].

polární. Zploštění i je definováno jako poměr

$$i = \frac{a - b}{a}. \quad (193)$$

Referenční elipsoid, který slouží jako (co nejlepší) náhrada geoidu, vznikl na základě družicových měření. Současným globálním standardem mezi referenčními elipsoidy je tzv. WGS-84, jehož střed leží ve středu Země a poloosy jsou $a = 6378137$ m, $b = 6356752,3$ m. Zploštění je $i=1:298,257$. Tento elipsoid se používá např. při satelitní navigaci GPS. Ostatní referenční elipsoidy lze definovat pomocí posunutí jejich středu vůči středu WGS-84, případně i změnou délky poloos (změnou délky hlavní poloosy a rozdílem zploštění). Zploštění Země není pouhým okem rozpoznatelné a proto má Země z vesmíru tvar dokonalé koule.

Přesnějším vystižením tvaru geoidu je *trojosý rotační elipsoid* popsany rovnicí (Burša 1995)

$$\left(\frac{x}{a}\right)^2 + \left(\frac{y}{b}\right)^2 + \left(\frac{z}{c}\right)^2 = 1, \quad (194)$$

s rovníkovým zploštěním

$$i_R = \frac{a - b}{a}. \quad (195)$$

Polární zploštění je definováno obdobně jako

$$i_P = \frac{a - c}{a}. \quad (196)$$

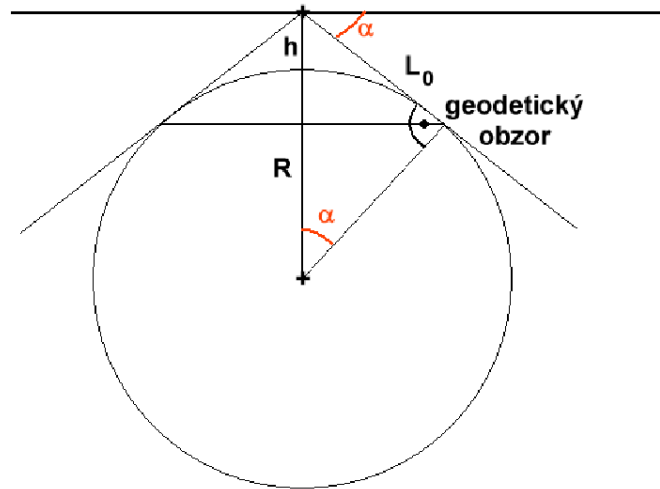
Parametry elipsoidu jsou $a = 6378173$ m, $i_R = 1 : 94000$, $i_P = 1 : 297,787$, přitom hlavní osa x protíná rovník na zeměpisné délce $\lambda_a = 14,8^\circ$. Tomuto modelu se nejvíce přibližuje rotační elipsoid s parametry $a = 6378139$ m a $i = 1 : 297,257$.

Skutečný tvar Země je znázorněn na obrázku 57, ze kterého je patrné, že se severní polokoule liší od jižní, tvarem připomíná hrušku. Odchyly od ideálního tvaru jsou cca. 50 metrů.

Že je Země přibližně kulatého tvaru lze dokázat jednak pozorováním jejího stínu při zatměních Měsíce, různou výškou Polárky nad obzorem v závislosti na zeměpisné šířce nebo přímým pozorováním z družic.

4.3 Dohlednost a deprese obzoru

Stojíme-li na zemském povrchu, čím se nacházíme ve větší nadmořské výšce, tím se nám vzdálenost, do které vidíme objekty na Zemi zvětšuje. Je to dáno jejím zakřivením, jak je znázorněno na obrázku 58.



Obrázek 58: Geodetický obzor pro výšku pozorovatele h nad povrchem Země.

Pro vzdálenost geodetického obzoru vyjdeme z obrázku 58, ze kterého platí, že

$$L_0 = [(R+h)^2 - R^2]^{1/2} = \left[2Rh \left(1 + \frac{h}{2R} \right) \right]^{1/2} \doteq \sqrt{2Rh} \quad (197)$$

a pro tangentu pak (α je tzv. úhel deprese)

$$\tan \alpha = \left[\frac{(R+h)^2 - R^2}{R^2} \right]^{1/2} \doteq (2h/R)^{1/2}. \quad (198)$$

Pro případ, že by Země byla bez atmosféry, pak vychází pro výšku $h = 10$ m úhel deprese $\alpha = 6' 5''$ a vzdálenost geodetického obzoru $L_0 = 11,29$ km. Vlivem refrakce je však skutečná vzdálenost L geodetického obzoru větší, $L > L_0$. Dohlednost za normálních podmínek je větší přibližně o 6,5 %. Hodně však záleží na teplotním rozvrstvení přízemní atmosféry, která má na refrakci velký vliv.

4.4 Šířka geocentrická, geodetická a astronomická

Vzhledem k tomu, že je tvar Země odlišný od koule a popisujeme jej pomocí rotačního elipsoidu, rozlišujeme různé typy zeměpisných šířek. Šířka geocentrická Ψ souvisí s úhlem mezi místem na povrchu, středem Země a rovníkem, šířka geodetická φ pak s úhlem mezi místem na povrchu, těžištěm (místem do kterého míří tížnice) a rovníkem. Z rovnice rotačního elipsoidu

$$\left(\frac{\rho}{a}\right)^2 + \left(\frac{z}{b}\right)^2 = 1 \quad (199)$$

vychází, že úhel φ je roven

$$\tan \varphi = -\frac{d\rho}{dz} \text{ a } \frac{2\rho d\rho}{a^2} + \frac{2z dz}{b^2} = 0, \quad (200)$$

z čehož pak plyne

$$\tan \varphi = -\frac{a^2}{b^2} \frac{z}{\rho} = \frac{a^2}{b^2} \tan \Psi. \quad (201)$$

Protože ale také platí, že

$$\frac{a^2}{b^2} = \frac{1}{1 - e^2}, \quad (202)$$

vyjde nám pro vztah mezi Ψ a φ

$$\tan \Psi = (1 - e^2) \tan \varphi. \quad (203)$$

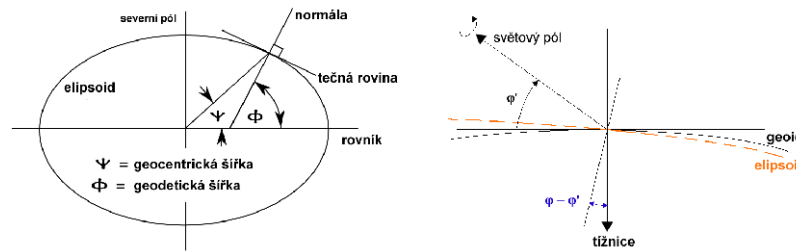
Maximální rozdíl mezi geocentrickou a geodetickou šířkou je pro úhel $\varphi = 45^\circ$ a činí $\Delta = 11' 33''$. Pro rovník a pro póly jsou tyto šířky shodné.

Astronomická šířka φ' je definována jako úhel mezi osou rotace a kolmicí k místní tížnici $\varphi = \varphi' - \Delta\varphi$ (viz obr. 59 vpravo), kde $\Delta\varphi$ je tížnicová odchylka.

V důsledku polárního zploštění Země směrem k pólům roste vzdálenost mezi rovnoběžkami. Zatímco na rovníku odpovídá jednomu stupni vzdálenost rovnoběžek 110,576 km, v blízkosti pólů je to již 111,695 km.

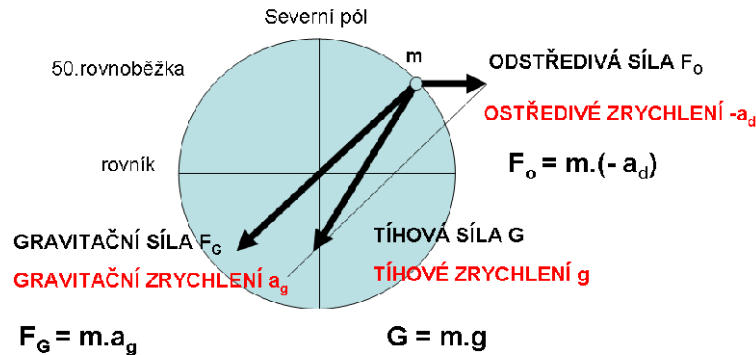
4.5 Hmotnost a gravitační pole Země

Rozložení hmoty v tělese určuje tíhové pole, jehož studiem se zabývá gravimetrie. Gravitační zrychlení \vec{g} souvisí s gravitačním potenciálem rovnicí $\vec{g} = -grad V$, velikost gravitačního zrychlení určuje např. chod kyvadlových hodin (na přelomu 19. a 20. století metodika R. Sternecka pro měření tíhového zrychlení pomocí přesných kyvadlových hodin). Pokud je budeme na povrchu přemisťovat, můžeme proměřit velikost \vec{g} v závislosti na poloze na Zemi. Zjistíme, že velikost \vec{g} souvisí se



Obrázek 59: Vlevo je zobrazena geocentrická a geodetická zeměpisná šířka (upraveno dle [E23]), vpravo pak šířka astronomická.

zeměpisnou šířkou a rotací, která způsobuje zploštění Země. Studium tížnicových odchylek můžeme odhalovat nehomogenity v rozložení hmot, nicméně odchylky tížnice od kolmice nejsou až tak výrazné, jak by se mohlo zdát z členitosti terénu. Např. G. Everet zjistil, že skutečný účinek Himaláje na odklon tížnice je 3x menší, než odpovídá výpočtu z rozložení hmoty na povrchu. Jediným vysvětlením je předpoklad kompenzujících hustotních nehomogenit v zemském nitru (tzv. *izostáze* - rovnovážný stav).



Obrázek 60: Gravitační, tíhové a odstředivé zrychlení a síly.

Na velikost výsledné gravitační síly má vliv síla odstředivá. Pro úhlovou rychlost rotace Země platí

$$\omega = \frac{2\pi}{P} = 7,2921 \cdot 10^{-5} \text{ rad/s}, \quad (204)$$

pro střední hodnotu gravitačního zrychlení (pro ideálně kruhovou nerotující Zemi),

$$\bar{g} = \kappa \frac{M_\oplus}{R_\oplus^2} = 9,823 \text{ m/s}^2, \quad (205)$$

pokud $M_{\oplus} = 5,976 \times 10^{24}$ kg a součin $\kappa M_{\oplus} = 3,986 \times 10^{14}$ m³/s², což je přímo měřitelná veličina. Za standardní velikost gravitačního zrychlení byla zvolena hodnota $g_0 = 9,80665$ m/s² jako převodní faktor mezi hmotností a váhou tělesa. Odstředivé zrychlení na rovníku je $a_{ods.} = 3,39 \times 10^{-2}$ m/s² a vzájemný poměr $g_0/a_{ods.} = 1/288,38$.

Pro zjištění gravitačního zrychlení na konkrétní zeměpisné šířce a nadmořské výšce můžeme použít Helmertova vztahu

$$g_{\varphi} = (9,8061999 - 0,0259296 \cos(2\varphi) + 0,0000567 \cos^2(2\varphi)) - 3,086 \times 10^{-6} h. \quad (206)$$

Rozdíl mezi gravitačním zrychlením na rovníku a pólu činí

$$g_{90^{\circ}} - g_{0^{\circ}} = (5,2 \times 10^{-2}) \text{ m/s}^2, \quad (207)$$

kde 2/3 této hodnoty jsou dány odstředivou silou a 1/3 zploštěním Země.

4.6 Rotace Země

Země se otáčí kolem své severojižní osy jako tuhé těleso, tzn. toutéž úhlovou rychlostí ω . Vztáhneme-li tento pohyb, pak vůči hvězdnému pozadí je otočení o 360 stupňů rovno siderické periodě rotace, která je rovna $\omega = 2\pi/P = 7,29211508 \times 10^{-5}$ rad/s. Unášivá rychlost bodu na zemském povrchu (koule) je dána vztahem

$$v_{\varphi} = \omega_{\oplus} R_{\oplus} \cos \varphi, \quad (208)$$

maximální rychlost je na rovníku a to 465,1 m/s, pro naši zeměpisnou šířku pak 290 m/s. Tuto rychlost musíme brát na zřetel při velmi přesných měřeních radiálních rychlostí kosmických objektů. Unášivá rychlost se projevuje odstředivou silou, která souvisí s odstředivým zrychlením na rovníku, které je rovno $3,39 \times 10^{-2}$ m/s².

Základním zákonem, který reguluje rotaci Země, je zákon zachování momentu hybnosti

$$\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p} = \vec{r} \times m\vec{v} \quad \text{a} \quad \vec{v} = \vec{\omega} \times \vec{r}. \quad (209)$$

Součet příspěvků k velikosti momentu hybnosti od jednotlivých hmotných elementů dm je roven $|\vec{r} \times \vec{v}| = r^2\omega$, odkud plyne

$$L = \omega \int r^2 dm = \omega I, \quad (210)$$

kde I je moment setrvačnosti $I = \int r^2 dm$. Osa rotace Země prochází těžištěm, takže $\vec{R} \int dm = \int \vec{r} dm$, rotační energie Země je tedy $E_{rot} = 1/2 I \omega^2$.

Zákon zachování momentu hybnosti nám říká, že žádná vnitřní energie není schopna změnit hodnotu momentu hybnosti \vec{L} , těleso se může přemísťovat jen tak, že jeho osa zůstává rovnoběžná sama se sebou (gyroskop, rotující tělesa v prostoru). Se změnou rotace ($d\omega/dt \neq 0$) dochází proto ke změně momentu setrvačnosti $I = \int r^2 dm$, což souvisí s přerozdělením hmoty v tělese Země (hlavně v rovníkových oblastech).

Vnější síly, které působí na rotující Zemi, způsobují momenty sil, které mají za následek změnu orientace rotační osy (precese) a může dojít i ke změně momentu hybnosti, což má za následek brždění rotace Země (a zvětšování velké poloosy dráhy Měsíce kolem Země).

4.7 Důkazy rotace Země

Nepřímým důkazem je pohyb kosmických těles po obloze, který může mít sice dvojitý výklad, ale vysvětlení rotací Země je přirozenější. V případě nehybné, nerotující Země, by musela mít vzdálená tělesa velké oběžné rychlosti, všechny hvězdy by musely mít shodné oběžné periody, což je nepravděpodobné a pozorujeme-li navíc tělesa ve sluneční soustavě, všechna se otáčejí (tak proč by se neměla otáčet i Země).

Mezi přímé důkazy rotace patří účinek neinerciálních sil (*Coriolisova a odstředivá síla*): stáčení roviny kyvu *Foucaultova kyvadla* či *odchylka padajících těles*. Coriolisova síla se objevuje v rotující (tedy neinerciální) vztažné soustavě. Tato síla způsobuje zrychlení, jehož vektor je dán vztahem $\vec{a}_c = 2\vec{v} \times \vec{\omega}$. Má mimo jiné za následek stáčení meridionálních vzdušných i vodních proudů na Zemi (viz obr. 61).



Obrázek 61: Vlevo je znázorněno stáčení trajektorií proudů na Zemi vlivem Coriolisovy síly [E24] a vpravo je Foucaultovo kyvadlo v Paříži [E25].

Jean Bernard Léon Foucault (1819–1868) se proslavil pokusem v pařížském Pantheonu (obr. 61 vpravo), kde v roce 1851 přímo dokázal s kyvadlem délky 67 metrů, že se Země otáčí (pro Paříž rychlost stáčení roviny kyvu je 1° za hodinu). Vzhledem k tomu, že je rotující Země neinerciální vztažnou soustavou, kyvadlo si zachovává počáteční rovinu kyvu vůči rotujícímu zemskému povrchu. Pro pozemského pozorovatele se zdá, že se rovina kyvadla stáčí v opačném směru, než rotuje Země. Úhlová rychlost stáčení je dána $\omega = 360^\circ \sin \varphi$ za den. Na rovníku se rovina kyvu nemění, na pólu opíše 360° za den.

Odchylka padajících těles je dalším přímým důkazem rotace Země. Vlivem Coriolisova zrychlení, které urychluje těleso směrem na východ, je tak volně padající těleso odkloněno od svého původního směru. Velikost Coriolisova zrychlení je dána

$$a_{\text{Cor.}} = 2t|\vec{g} \times \vec{\omega}| = 2tg\omega_{\oplus} \cos \varphi. \quad (211)$$

Integrací pohybové rovnice získáme (osa x míří na východ)

$$\ddot{x} = a_{\text{Cor.}} \implies x = \frac{1}{3} g \omega_{\oplus}^2 t^3 \cos \varphi = \frac{2}{3} \omega_{\oplus} \left(\frac{2h^3}{g} \right)^{1/2} \cos \varphi. \quad (212)$$

Dosadíme-li za $\omega_{\oplus} = 7,3 \cdot 10^{-5} \text{ rad/s}$, $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ a pro výšku zvolíme $h = 100 \text{ m}$ a zeměpisnou šířku 50 stupňů, pak nám odchylka padajícího tělesa vyjde rovna

$$x = 2,195 \times 10^{-5} h^{2/3} \cos \varphi = 1,4 \text{ cm!} \quad (213)$$

První experiment s dostatečnou výškou uskutečnil v roce 1791 Giovanni Battista Guglielmini na jedné z věží města Bologna. Tělesa pouštěl přibližně ze 78 m výšky a pro 15 pokusů byla průměrná odchylka 16 mm směrem na východ (teoretická hodnota je $10,7 \text{ mm}$). Velmi přesná měření odchylek padajících těles byla provedena v roce 1831 v uhelném dole poblíž Freiburgu F. Reichem, ve kterém byla šachta hluboká $158,4$ metrů a na základě těchto měření odchylka vycházela $27,4 \text{ mm}$ (teoretická hodnota je $28,1 \text{ mm}$).

4.8 Změny v rotaci Země

Změny v rotaci Země můžeme rozdělit do tří kategorií

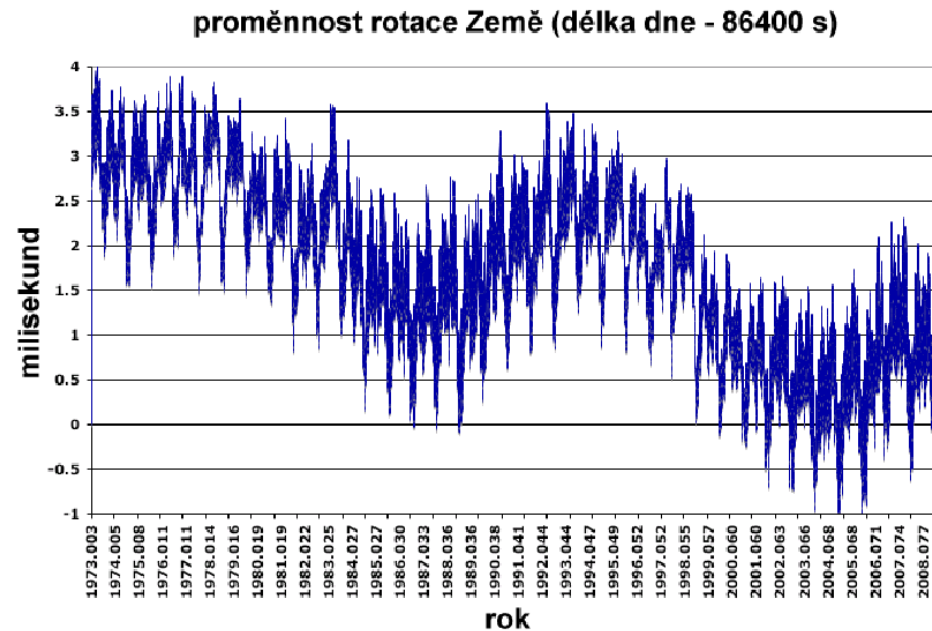
- 1) dlouhodobé (sekulární) změny v periodě rotace,
- 2) nepravidelné skokové změny v rychlosti rotace a
- 3) sezónní periodické změny.

Dlouhodobé změny rotace souvisejí se zpomalováním rotace Země. V důsledku slapového tření se přenáší moment hybnosti z její rotace do momentu hybnosti Měsíce, čímž se prodlužuje jeho oběžná doba a roste jeho vzdálenost od Země. Slapová vlna se šíří proti rotaci Země. Brždění činí přibližně mezi $0,001$ – $0,002 \text{ s}$ za století. To potvrzují pozorování okamžiků zatmění, dále paleontologické nálezy rychlosti růstu korálů, ze kterých lze usoudit, kolik bylo dní v roce. Např. pro střední devon (před 380 milióny lety) tak byla perioda rotace mezi $21,7$ – $22,5$ hodinami a rok trval 397 ± 7 dnů.

Nepravidelné skokové změny souvisejí s přeskupováním hmot v nitru Země a mohou být až v řádech několika tisícín sekundy. Jako příklad zde můžeme uvést zemětřesení v Tóhoku o síle $9,0$ stupně Richterovy škály a následné až 38 metrů vysoké tsunami, které zasáhly v pátek 11. března 2011 v 6.46 SEČ severovýchodní pobřeží Japonska. Epicentrum zemětřesení bylo v moři u ostrova Honšú, zhruba 130 kilometrů východně od města Sendai v hloubce 24 kilometrů. Severovýchodní Japonsko, se vlivem zemětřesení posunulo o $2,4$ metru k Severní Americe. Části Japonska nejbliže k epicentru, v délce 400 km , poklesly o $0,6$ metru, což významně umožnilo šíření tsunami do vnitrozemí. Pacifická deska se posunula na západ až o 20 metrů. Zemská osa se posunula o 10 cm , což způsobilo změnu délky dne i naklonění planety Země. Den se zkrátil o $1,8$ mikrosekundy.

Periodické změny v rychlosti rotace Země jsou porovnávány s atomovým časem. Roční perioda změn má amplitudu přibližně $0,022 \text{ s}$, souvisí s přesunem vzdušných hmot, sněhové a ledové pokrývky a vegetací. Půlroční perioda má amplitudu

0,010 s, je důsledkem eliptické trajektorie Země kolem Slunce, v perihéliu je silnější gravitační působení Slunce na Zemi než v aféliu. Poslední periodická změna v rotaci Země souvisí s anomalistickým Měsícem a půlměsícem, Měsíc obíhá rovněž po eliptické trajektorii.



Obrázek 62: Zpomalování rotace Země v milisekundách [E26].

4.10 Důsledky rotace Země

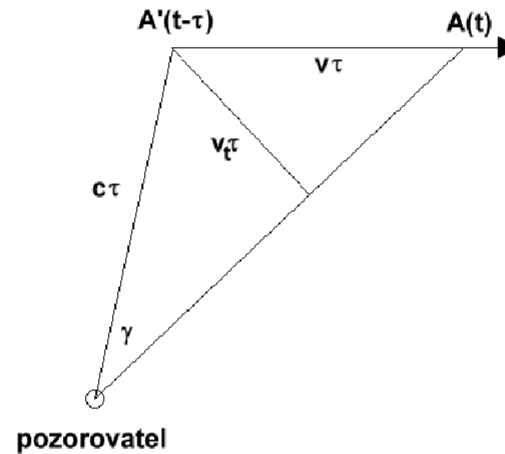
Důsledky, se kterými se můžeme setkat vlivem rotace Země jsou následující:

- 1) vychylování pohybujících se objektů Coriolisovou silou na severní polokouli doprava, na jižní doleva (v našich zeměpisných šířkách převládá západní proudění atmosféry), stáčení mořských proudů, asymetrie říčních koryt,
- 2) střídání dne a noci,
- 3) slapové jevy,
- 4) pohyb těles po obloze, jejich východy a západy,
- 5) tvar Země, v 1. přiblížení rotační elipsoid, odstředivá síla způsobuje zploštění,
- 6) denní paralaxa blízkých těles, pro Měsíc $\pi = 6378/384400 = 57'$.

4.11 Oběh Země kolem Slunce, aberace, paralaxa

Pozorovatel na povrchu Země vykonává složitý pohyb. Jeho pozorovací stanoviště je bodem v neinerciální vztažné soustavě. Uvážíme-li k tomu ještě konečnou rychlost šíření světla, pak nám vznikne celá řada efektů, které komplikují lokalizaci objektu v prostoru, například pozorovaný směr k objektu není obecně totožný se spojnicí obou bodů v prostoru.

V případě, že se těleso vůči nám v dráze posouvá, my je díky konečné rychlosti šíření světla vidíme se zpožděním, které je potřeba uvažovat. Oprava na šíření světla je dána rovnicí $\tau = 499,006 \Delta$ sekund a Δ je zde v astronomických jednotkách. Úhel mezi pozorovanou polohou a skutečnou polohou tělesa je dán $\gamma = \arcsin \frac{v\tau}{c}$ (obrázek 63).



Obrázek 63: Oprava na šíření světla.

4.12 Aberace

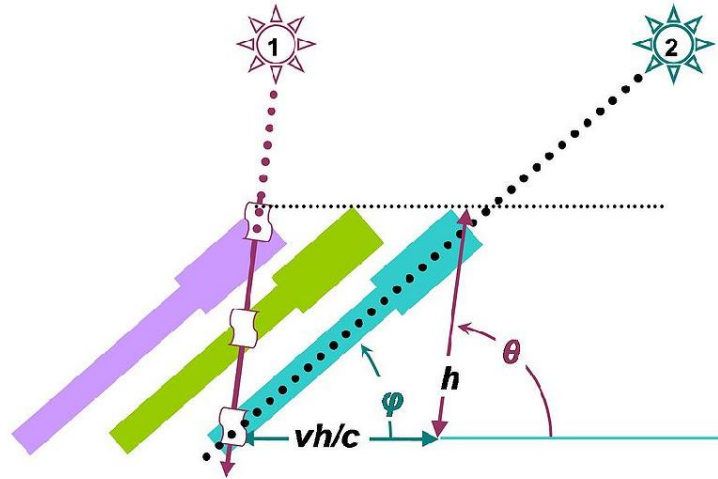
S relativním pohybem Země kolem Slunce souvisí i ten fakt, že se při pozorování hvězd projevuje změna jejich souřadnic jak během roku (*roční aberace*), tak i během dne (*denní aberace*). Směr ke vzdáleným hvězdám vztahujeme ke Slunci (těžišti sluneční soustavy), což je dostatečně inerciální soustava, vůči které se pozorovatel pohybuje okamžitou rychlostí \vec{v} . Směr jeho pohybu je roven tzv. *apexu pohybu*.

Při ročním oběhu Země kolem Slunce se apex posouvá po ekliptice. Abychom hvězdu viděli ve středu zorného pole dalekohledu, musíme jej sklonit o úhel $(\Theta - \varphi)$ směrem k apexu, viz obrázek 64. Aberace závisí pouze na rychlosti pozorovatele a ekliptikální šířce pozorovaného objektu. Protože platí

$$\frac{\sin(\Theta - \varphi)}{v} \approx \frac{\sin \varphi}{c} \quad (214)$$

a navíc je poměr v/c malý, dostaneme

$$\Delta\Theta = \Theta - \varphi \approx \frac{v}{c} \sin \varphi. \quad (215)$$



Obrázek 64: Aberace světla. [E28]

Pro větší rychlosti pohybu je potřeba aberaci počítat již ze speciální teorie relativity jako

$$\Delta\Theta = \Theta - \varphi = \frac{v}{c} \sin \varphi + \frac{1}{4} \left(\frac{v}{c}\right)^2 \sin 2\Theta. \quad (216)$$

Pro Zemi je poměr v/c roven přibližně $1/10000$, což dává aberační úhel cca $20,5''$. V okolí pólu ekliptiky budeme během roku pozorovat aberační kružnici o poloměru $a = 20,49552''$, budeme-li se blížit rovině ekliptiky, kružnice přejde do elipsy, jejíž malá poloosa bude mít úhlovou velikost $b = 20,49552'' \sin \beta$. V rovině ekliptiky pak budeme pozorovat pouze aberační přímku. Vektor \vec{v} se mění během roku, tím se mění i velikost a směr aberace, která leží na hlavní kružnici procházející tělesem a apexem.

Složky hvězdné aberace můžeme rozdělit na

- denní - souvisí s rotací Země ($v \sim 0,46$ km/s),
- roční - pohyb Země kolem Slunce ($v \sim 30$ km/s),

- c) pohyb Země vůči těžišti soustavy Země-Měsíc zanedbáváme ($v \sim 0,01$ km/s),
 d) sekulární - pohyb těžiště sluneční soustavy prostorem (v Galaxii).

V praxi sekulární aberaci nelze odlišit od opravy na šíření světla, tuto aberaci neurčujeme, je součástí tzv. střední polohy hvězd.

Korekce souřadnic pro denní aberaci můžeme vypočítat podle vztahů

$$\begin{aligned}\Delta\alpha &= 0,0213^s \cos\varphi \cos t \sec\delta \\ \Delta\delta &= 0,320'' \sin\varphi \sin t \sin\delta,\end{aligned}\quad (217)$$

maximální posun v rektascenzi bude pro hodinový úhel $t = 0^\circ$ a $t = 180^\circ$, v deklinaci pak $t = \pm 90^\circ$ pro deklinaci objektu rovnu $\delta = 90^\circ$.

Pro roční aberaci je nutné znát okamžitý vektor rychlosti \vec{v} oproti těžišti sluneční soustavy. Ten lze vypočítat numerickou derivací geocentrických pravoúhlých souřadnic Slunce a heliocentrických pravoúhlých souřadnic planet (nejdůležitější je planeta Jupiter). Roční aberace byla odhalena již v roce 1725 J. Bradleyem a S. Molyneauxem, v roce 1728 pak Bradley podal její výklad.

4.13 Variace radiální rychlosti, heliocentrická korekce

Vzhledem k tomu, že Země obíhá kolem Slunce, téměř vždy se projeví při měření radiální rychlosti objektu kolísání frekvence (perrody)

$$\frac{\Delta\nu}{\nu_0} = \frac{v_{\text{rad}}}{c}.\quad (218)$$

V tomto vztahu je ν_0 střední (laboratorní) frekvence a $\Delta\nu$ je rozdíl mezi touto frekvencí a frekvencí naměřenou. Nemusí však jít vždy jen o elektromagnetické záření, může jít také o frekvenci pulsaru či oběhu dvojhvězdy pozorované prostřednictvím elektromagnetického záření. Radiální rychlost můžeme určit ze spektra jen tehdy, známe-li laboratorní vlnovou frekvenci ν_0 a změřený rozdíl $\Delta\nu$.

Při pozorování ze Země se během roku projeví tzv. variace radiální rychlosti, která souvisí jednak s rotací Země kolem osy (maximální hodnoty jsou na rovníku ráno a večer) a dále pak s jejím oběhem kolem Slunce. Maximální změna radiálních rychlostí je u objektů, jejichž ekliptikální šířka je rovna nule, pro objekty v pólech ekliptiky je pak změna nulová.

Pro správné určení hodnot radiálních rychlostí objektů je proto potřeba přepočítat jejich velikosti vůči Slunci na heliocentrickou radiální rychlost (nejlépe pak vůči těžišti sluneční soustavy). Důležité je rovněž čas, kdy byl objekt pozorován, převést z pozemského času na čas heliocentrický. Tomuto kroku se říká heliocentrická korekce, která může činit mezi ± 8 minutami a souvisí s dobou šíření světla. Nulová je pro objekty na pólech ekliptiky, maximální pro objekty, které jsou v opozici se Sluncem, minimální pro jejich konjunkci se Sluncem.

4.14 Paralaxa

Jedním z důkazů, že Země obíhá kolem Slunce, je zjištění paralaxy hvězd. To se však dlouho nedařilo. Naopak, denní paralaxa Měsíce byla známa již ve starověku. Z praktického hlediska lze topocentrické (místo pozorovatele) a geocentrické

soustavy považovat za identické. Pro případ blízkých těles však tato místa nejsou shodná a v tomto případě pak hovoříme o denní paralaxe, která má jednodenní periodu vzhledem k rotaci Země. Rozdíly v rektascenzi a deklinaci pozorovaného objektu vzhledem ke středu Země a pozorovateli jsou dány vztahy (Seidelmann 2006)

$$\begin{aligned}\alpha' - \alpha &= -\pi \frac{\rho}{a} \cos \psi \sin H \sec \delta = -\pi c \sin (s - \alpha) \sec \delta \\ \delta' - \delta &= -\pi \frac{\rho}{a} (\sin \psi \cos \delta - \cos \psi \cos H \sin \delta) = \\ &= \pi [c \cos (s - \alpha) \sin \delta - s \cos \delta],\end{aligned}\quad (219)$$

kde π je horizontální rovníková paralaxa daná vztahem $\sin \pi = a/D$, ρ je vzdálenost středu Země a mořské hladiny ve směru pozorovatele, a je rovníkový poloměr Země, H je tzv. geocentrický hodinový úhel ($H = s - \alpha$) a ψ je geocentrická a φ geodetická zeměpisná šířka. Mezi geocentrickou a geodetickou šířkou platí vztahy

$$\begin{aligned}\rho \sin \psi &= (aS + h) \sin \varphi \implies s = \rho/a \sin \psi = (S + h/a) \sin \varphi \\ \rho \cos \psi &= (aC + h) \cos \varphi \implies c = \rho/a \cos \psi = (C + h/a) \cos \varphi,\end{aligned}\quad (220)$$

kde h je nadmořská výška v metrech v místě pozorování. Parametry S a C jsou dány vztahy (Seidelmann 2006)

$$S = \frac{(1 - i)^2}{\sqrt{\cos^2 \varphi + (1 - i)^2 \sin^2 \varphi}} \quad \text{a} \quad C = \frac{1}{\sqrt{\cos^2 \varphi + (1 - i)^2 \sin^2 \varphi}}.\quad (221)$$

Ze vztahů (202) a (193) získáme relaci

$$e^2 = 2i - i^2,\quad (222)$$

což po dosazení do rovnic (221) dává

$$S = \frac{1 - e^2}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}} \quad \text{a} \quad C = \frac{1}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}}.\quad (223)$$

Dosazením za $e^2 = 6.694385 \times 10^{-3}$ a rovníkového poloměru $a = 6378,136$ km (Cox 2000) do rovnic (220) a (223) dostaneme

$$\begin{aligned}s &= [0,993306(1 - 0,006694 \sin^2 \varphi)^{-1/2} + 0,1568h \times 10^{-6}] \sin \varphi \\ c &= [(1 - 0,006694 \sin^2 \varphi)^{-1/2} + 0,1568h \times 10^{-6}] \cos \varphi.\end{aligned}\quad (224)$$

Roční paralaxu uvažujeme jen u hvězd, které jsou nejbližší Slunci. Jde o úhel, pod nímž z dané hvězdy vidíme poloměr zemské trajektorie. Vzhledem k tomu, že tyto úhly jsou menší než $1''$, byla paralaxa změřena až v roce 1838 F. Bessel u hvězdy 61 Cygni. Proxima Centauri má paralaxu $0,7687 \pm 0,0003$ arcsec. Vyjádříme-li si pravouhlé geocentrické rovníkové souřadnice Slunce v astronomických jednotkách jako

$$\begin{aligned}X &\doteq \cos L = \cos \delta_{\odot} \cos \alpha_{\odot} \\ Y &\doteq \sin L \cos \varepsilon = \cos \delta_{\odot} \sin \alpha_{\odot} \\ Z &\doteq \sin L \sin \varepsilon = \sin \delta_{\odot}\end{aligned}\quad (225)$$

$$\begin{aligned}\alpha' - \alpha &= \pi(Y \cos(\alpha) - X \sin \alpha) \sec \delta \\ \delta' - \delta &= \pi[Z \cos \delta - X \cos \alpha \sin \delta - Y \sin \alpha \sin \delta],\end{aligned}$$

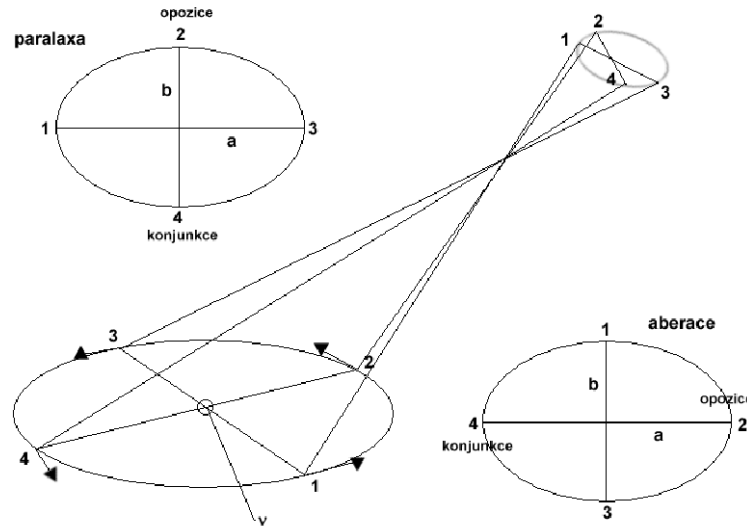
kde π je roční paralaxa.

4.15 Srovnání paralaxy a aberace

Trajektorie Země je sice elipsa, ale pro paralaxu ji můžeme aproximovat kružnicí o poloměru 1 astronomické jednotky. Pouze na pólech ekliptiky je paralaxa kružnicí o poloměru $a = \pi$, pro ekliptikální šířku β pak kružnice přechází na elipsu s malou poloosou $b = \pi \sin \beta$, až v rovině ekliptiky bude místo elipsy pouze úsečka. Maximální výchylky jsou pro rozdíly ekliptikálních délek objektu a Slunce

$$\begin{array}{ll} 1. \lambda_{\odot} - \lambda_{*} = 90^{\circ} & 3. \lambda_{\odot} - \lambda_{*} = 270^{\circ} \\ 2. \lambda_{\odot} - \lambda_{*} = 180^{\circ} & 4. \lambda_{\odot} - \lambda_{*} = 0^{\circ} \end{array}, \quad (226)$$

kde v bodě 2 je objekt v opozici a v bodě 4 v konjunkci se Sluncem (viz obr. 65). Na severní polokouli se pohybuje objekt po paralaktické elipse v matematicky záporném směru, tj. z bodu 1 přes body 2 a 3 až do bodu 4. Naproti tomu je aberace maximální, je-li maximální tečná rychlost, tj. vůči opozici a konjunkci je vše posunuto o $\pi/2$ (o čtvrt roku opožděno).



Obrázek 65: Porovnání paralaxy (nahore) a aberace v průběhu roku (dole).

V bodech 1 a 3 je maximální radiální rychlost Země vůči hvězdě a to $\Delta v_r = -v_{\oplus} \cos \beta$ v bodě 1 a $\Delta v_r = v_{\oplus} \cos \beta$ v bodě 3. Vůči radiální heliocentrické rychlosti hvězdy v_{r0} tak variace radiální rychlosti způsobí rozkmit, který je roven $2v_{\oplus} \cos \beta$.

Rovněž rozdíl časů, kdy přijde signál z pozorovaného objektu k Zemi a Slunci, se mění, pouze v bodech 1 a 3 a v pólech ekliptiky, Slunci a hvězdě je heliocentrická korekce rovna nule. Maximální hodnoty korekce jsou pak v bodech 2 a 4 a jejich velikosti jsou $\Delta t = -\tau \cos \beta$ v bodě 2 a $\Delta t = \tau \cos \beta$ pro bod 4. Velikost

heliocentrické korekce může být maximálně rovna

$$\Delta t = \frac{r \cos \beta}{c} = \tau \cos \beta, \quad (227)$$

kde $\tau = 499$ s je oprava na šíření světla.

Existence paralaxy je jedním z hlavních důkazů pro platnost heliocentrického systému. Pokusy o její změření selhávaly ať již z důvodu neexistence vhodné metody či z důvodů nevhodných přístrojů. Tycho Brahe nezměřil paralaxu, což jej vedlo k podpoře geocentrické soustavy, stejně tak neuspěl ani Koperník. Problémem bylo, že jejich měření byla absolutní. Galileo Galilei i Christian Huyghens navrhli, že je lepší použít měření pozic relativních vůči hvězdám v pozadí, které mohou posloužit jako opěrné body. Tím se zvýší přesnost astrometrie a navíc se bližší hvězdy projeví změnou své polohy vůči vzdálenějším hvězdám na pozadí. Ale ani to nepřineslo úspěch, i když se o heliocentrickém modelu již nepochybovalo. Příčinou byla velká vzdálenost hvězd, u kterých je paralaxa menší než $\pi \ll 1''$. V roce 1838 Friedrich Bessel (1784–1846) určil paralaxu hvězdy 61 Cygni na $\pi = 0,314''$, dnes udávaná hodnota je $\pi = 0,286''$. Souběžně určil paralaxu Vegy Friedrich Georg Wilhelm von Struve (1793–1864) a Thomas James Henderson (1798–1844) pak vzdálenost Tolimanu (alfa Centauri).

Měření vzdálenějších hvězd je obtížnější, paralaktické úhly jsou velmi malé, spolehlivost byla do 20–30 pc. V této vzdálenosti se nachází ale málo důležitých a opěrných typů hvězd (ty jsou většinou hodně jasné a ve velkých vzdálenostech, v prostoru málo zastoupeny), což vede ke složitějšímu způsobu navazování vzdáleností. Velkým přínosem byla astrometrická družice HIPPARCOS (**H**igh **P**recision **PAR**allax **C**ollecting **S**atellite), která vystartovala v roce 1989 a po 4 letech změnila polohy a vlastní pohyby více než 100 tisíc hvězd s přesností 0,002''.

Všechny výše vzpomínané efekty (aberrace, paralaxa, variace radiální rychlosti, heliocentrická korekce i varicace v počtu meteorů) nám dávají důkazy o pohybu Země kolem těžiště sluneční soustavy.

4.16 Důsledky pohybu Země kolem Slunce

Země vzhledem ke hvězdám oběhne kolem Slunce za *rok siderický*, který je dlouhý 365,25636 dne. *Rok tropický* je dán dvěma po sobě následujícími průchody Slunce jarním bodem, tj. dobou od jarní do jarní rovnodennosti, trvá o něco méně než rok siderický a to 365,24219 dne. Tento rozdíl souvisí s tím, že se jarní bod pomalu posouvá po ekliptice proti pohybu Slunce. Do původní polohy se opětovně dostane až za necelých 26000 let a tato perioda se nazývá *rokem Platónským*. Posun jarního bodu souvisí s precesí zemské osy. Doba mezi dvěma průchody Země perihéliem se nazývá *rok anomalistický*, který trvá 365,25964 dne. Přímka apsid se stáčí ve směru pohybu Slunce po ekliptice, proto je anomalistický rok delší a do stejné pozice vůči hvězdám se přímka apsid vrátí po 110000 rocích. Velice důležitým rokem je rok drakonický, který je definován dobou mezi dvěma průchody Slunce výstupným uzlem měsíční dráhy. Uzlová přímka Měsíce se stáčí proti pohybu Slunce po ekliptice, proto je délka drakonického roku rovna 346,62006 dnům, do stejného bodu v prostoru se pak dostane za 19,6 let.

Oběh Země kolem Slunce se rovněž projeví ve střídání ročních období. Ani sklon rotační osy Země vůči rovině ekliptiky není konstantní a mění se v čase dle

$$\varepsilon(t) = 23^{\circ}26'21,4'' - 0,4684(t - 2000), \quad (228)$$

kde t je letopočet. Sluneční paprsky dopadají během roku na obě polokoule pod měnícím se úhlem, který souvisí se změnou deklinace Slunce na hvězdné obloze. Tato změna má pak za příčinu různé teploty, které souvisejí s tzv. středními klimatickými pásy. Ty vznikají tak, že jsou v rozdílných zeměpisných šířkách

- a) různé délky dne a noci,
- b) rozdílné výšky Slunce nad obzorem během dne,
- c) různě zmírňovány teplotní setrvačností a
- d) proměnlivou vzdáleností Země a Slunce během roku.

S tím souvisí množství energie, které od Slunce dopadá na zemský povrchu na jednotku plochy. Toto množství si můžeme vyjádřit jako

$$W = \frac{K}{r^2} \cos z = \frac{K}{r^2} \sin h, \quad (229)$$

kde K je sluneční konstanta, která je pro vzdálenost 1 astronomické jednotky rovna 1360 W/m^2 , r je vzdálenost od Slunce v astronomických jednotkách, z je zenitová vzdálenost a h pak výška Slunce nad obzorem. Insolace (oslunění) je pak energie, která dopadá za jeden den na 1 m^2 plochy na horní hranici zemské atmosféry a je dána vztahem

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \int_{t=-t_0}^{t=t_0} \frac{K}{r^2} \sin h \, dt \\ \sin h &= \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos t \\ \cos t_0 &= -\tan \varphi \tan \delta \end{aligned} \quad (230)$$

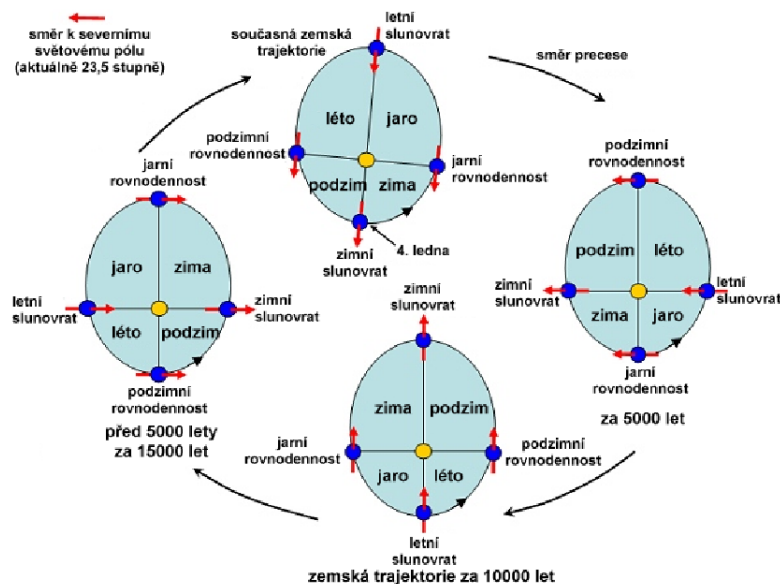
a po integraci a dosazení dostaneme

$$\varepsilon = \frac{K}{r^2} (2t_0 \sin \varphi \sin \delta + 2 \cos \varphi \cos \delta \sin t_0). \quad (231)$$

Mezní hodnota t_0 plyne z $\sin h = 0$. Jestliže je $\tan \varphi \tan \delta > 1$, Slunce nezapadá a $t_0 = \pi$. Naopak pro $\tan \varphi \tan \delta < 1$ Slunce nevychází a $t_0 = 0$.

Astronomická roční období jsou vzhledem k různé rychlosti Země v dráze různé dlouhá. Nejdelší je astronomické léto (pro severní polokouli), nejkratší pak astronomická zima. Letní půlrok je o 7,5 dne delší než zimní. Klimaticky je tak podnebí na severní polokouli mírnější, vlivem precese se však za 13000 let polokoule prohodí a bude tomu naopak. Celkové roční úhrny insolace jsou uvedeny v tabulce 7. Rozdíly nejsou až tak extrémní, je možné osídlit i vyšší zeměpisné šířky zejména v období krátkého léta.

Parametry zemské trajektorie nejsou konstantní a mění se v čase. Sklon zemské osy kolísá mezi $\varepsilon = 22^{\circ}04'$ a $\varepsilon = 24^{\circ}34'$ s periodou 41000 let. Při rostoucím sklonu



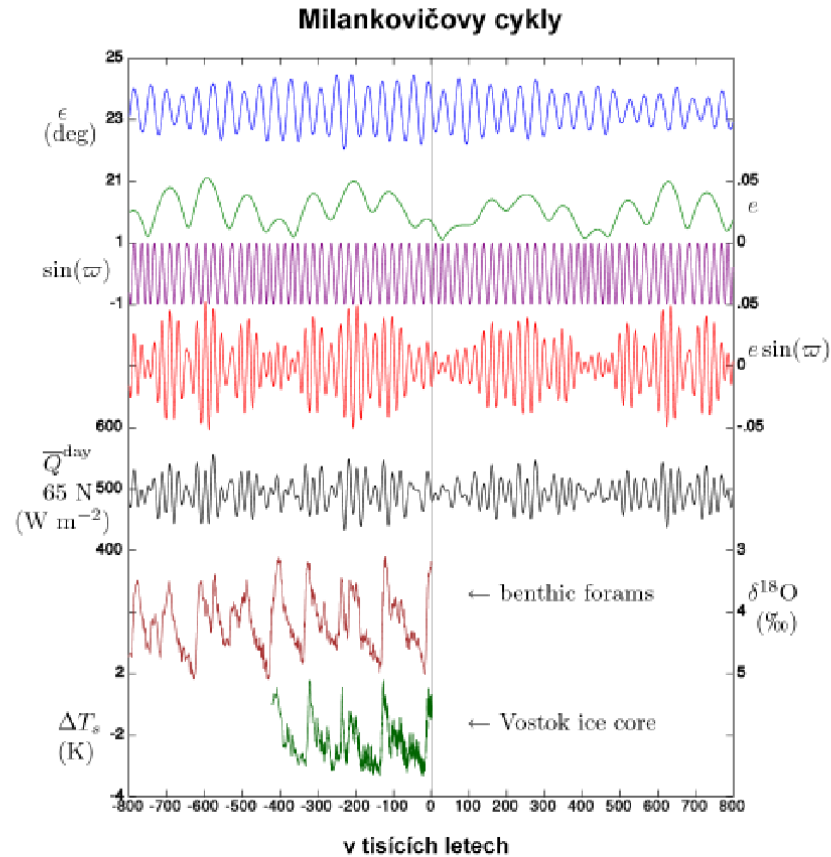
Obrázek 66: Vliv apsidálního pohybu (změna délky perihélia) na změnu ročních období (upraveno dle [E29]).

rotační osy bude i změna deklinace Slunce větší, takže léta pak budou teplejší (a zimy chladnější). Pro zjištění sklonu ekliptiky můžeme použít vztahu

$$\varepsilon = 23^{\circ}26'21,448'' - 46,8150''T - 0,00059''T^2 + 0,001813''T^3, \quad (232)$$

kde $T = (JD - 2451545,0)/36525$. Změna délky perihélia Π se děje s periodou 21000 let a v této periodě se Země dostává nejbližší Slunci v různých částech roku. Je-li $\Pi = 0^{\circ}$, nastává jarní rovnodennost v přísluní, $\Pi = 90^{\circ}$ je Země v přísluní v době zimního slunovratu (kratší a teplejší zima, delší a chladnější léto), $\Pi = 180^{\circ}$ je podzimní rovnodennost v přísluní a $\Pi = 270^{\circ}$ je Země v přísluní v době letního slunovratu (kratší a teplejší léto a delší a chladnější zima). S touto periodou se vyměňují role severní a jižní polokoule. Změny ve výstřednosti dráhy Země jsou s periodou cca 100000 let, excentricita se mění v rozmezí $0,0007 \div 0,0658$. V současnosti je rovna $0,0165$. Při vyšší excentricitě trajektorie je Země větší část oběhu ve větší vzdálenosti, což má za následek doby ledové. Délka velké poloosy se mění zcela nepatrně.

Všechny tyto periody se snaží popsat Milankovičova teorie (Milutin Milanković (1879-1958)), která předpokládá, že změny klimatu Země souvisejí s periodami změn výstřednosti zemské trajektorie, délkou perihélia, sklonem zemské osy a její precesí (viz obr. 67).



Obrázek 67: Minulé a budoucí Milankovičovy cykly. Nahoře je znázorněna změna sklonu zemské osy, pod ní pak změna excentricity zemské trajektorie, sinus délky perihélia a násobek excentricity a sinu délky perihélia. Černou barvou je pak závislost střední hodnota insolace pro zeměpisnou šířku 65 stupňů pro horní část atmosféry. Poslední dvě křivky dole znázorňují změny zastoupení izotopu kyslíku ¹⁸O v ukládaných sedimentech a změny teploty na růstu antarktického ledu ze stanice Vostok [E30].

Dosažením obou efektů získáme aproximaci s přesností na cca. 0,3 minuty. Časová rovnice pak nabude tvaru

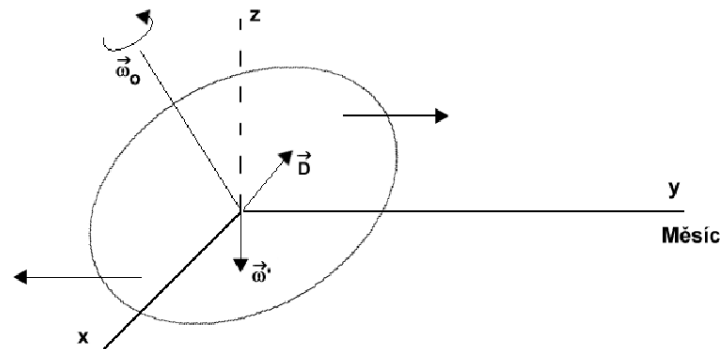
$$T_{PS} - T_{SS} = 0,46 \cos \tau - 7,34 \sin \tau - 3,36 \cos 2\tau - 9,33 \sin 2\tau, \quad (248)$$

kde $\tau = \frac{360^\circ}{365,25} D$ a rozdíl pravého a středního slunečního času vychází v minutách. D je opětovně počet dní od začátku roku.

4.19 Precese a nutace

Precesi objevil kolem roku 130 př.n.l. Hipparchos, který porovnával svá pozorování s pozorováním řeckých astronomů. Zjistil přírůstek ekliptikálních délek, které vysvětlil posunem jarního bodu proti směru pohybu Slunce. Ptolemaios precesi změřil na $36''$ za rok. Arabští astronomové mezi 10. a 11. stoletím precesi určili mezi $48''$ – $54''$ za rok. V roce 1260 perský hvězdář Nassir Edin pak určil velice přesnou hodnotu precese $51''$ za rok, která je velice blízká současné hodnotě $50,3''$ /rok. Od dob Hipparcha se jarní bod posunul zhruba o 30 stupňů.

Fyzikální vysvětlení precese podal až Isaac Newton, který popsal rotaci Země jako chování roztočeného setrvačnicku s rotační osou, na kterou působí vnější síly a pokud mají vůči tělesu určitý moment, pak vyvolávají precesi (viz obr. 72). Moment sil \vec{D} působených Měsícem a Sluncem na zploštělou Zemi chce osu Země

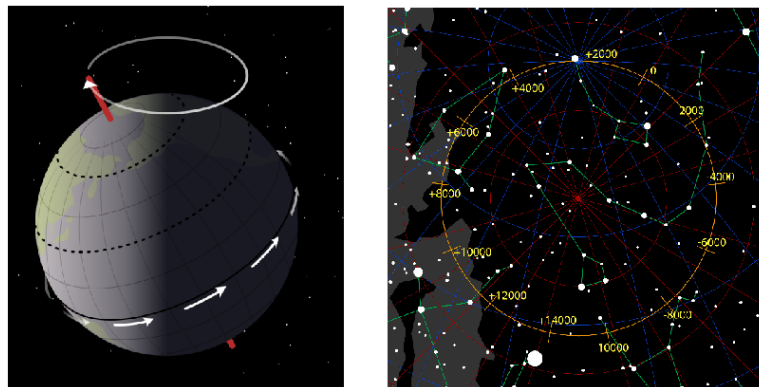


Obrázek 72: Výsledný moment sil \vec{D} , který vzniká působením dvojice sil Měsíce a Slunce za zploštělou Zemi.

narovnat vůči rovině ekliptiky. Výsledkem tak je pohyb zemské osy okolo pólu ekliptiky. Velikost momentu sil je dán vektorovým součinem

$$\vec{D} = C(\vec{\omega}' \times \vec{\omega}_0), \quad (249)$$

kde vektor $\vec{\omega}'$ míří do jižního pólu ekliptiky. Pohyb rotační osy země se děje v opačném smyslu než rotace a oběh Země kolem Slunce. Díky tomu je tropický rok

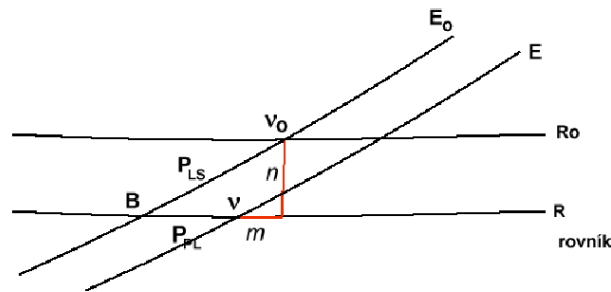


Obrázek 73: Vlevo je znázorněn precesní pohyb rotační osy Země [E36] a vpravo pak změna severního světového pólu pro různá období [E37].

kratší než rok siderický. Celý kuželovitý pohyb vykoná osa Země za 1 platónský rok, který trvá 25729 let. Osa však ve skutečnosti vykonává daleko složitější pohyb. V roce 1747 objevil James Bradley (1693–1762) periodickou složku tzv. *nutaci*, kterou v roce 1749 vysvětlil Jean le Rond d'Alambert (1717–1783) a jeho výklad pak zjednodušil Leonhard Euler (1707–1783). Nutace vzniká působením časově proměnného momentu síly, který odpovídá periodě 18,6 let a souvisí s precesí výstupného uzlu měsíční dráhy. Pozorovaná amplituda činí asi $17''$.

Celková precese se skládá z precesních pohybů, které jsou způsobeny všemi tělesy sluneční soustavy, ale hlavní podíl je dán Měsícem a Sluncem. Jejich společným působením vzniká lunisolární precese, která je $50,41''/\text{rok}$ (60 % připadá na gravitační vliv Měsíce a 40 % na vliv Slunce). Vliv působení planet pak zahrnujeme do pojmu planetární precese Země. Počítá se přímo změna dráhy Země, čímž se mění poloha pólu ekliptiky, tj. sklon o $-0,46''/\text{rok}$ (v roce 2000 byl sklon zemské osy $\varepsilon = 23^{\circ}26'21,448''$) a posouvají jarní bod o $-0,12''/\text{rok}$ proti lunisolární precesi. Celková (generální) precese je pak složena z obou složek a její hodnota pro rok 2012 je $50,2906''/\text{rok}$.

Důsledkem precese a nutace je změna polohy světového pólu, s tím souvisí změna oblohy viditelné z daného místa. Hvězda Polárka tak bude nejbližše severního světového pólu v roce 2103 a bude vzdálena od něj $27'$, v roce 12000 bude „Polárkou“ Vega (viz obr. 73) a v roce 3000 př.n.l. byla nejbližše pólu hvězda Thuban (α Dra). Za několik tisíc let tak bude z Evropy viditelný Jižní kříž, ale nebude viditelný Sirius a část Orionu. Protože se poloha jarního a podzimního bodu od dob Hipparchových posunula o cca 30 stupňů, souvisí s tím nesoulad mezi polohou Slunce v souhvězdích a znameních, které se o jedno znamení posunulo (ve znamení Berana je Slunce v Rybách). Vlivem precese se také mění ekliptikální souřadnice, můžeme říci, že se zhruba mění jen ekliptikální délka, která narůstá o $50,2906''/\text{rok}$. Neplatí to úplně přesně, neboť se díky planetární precesi také mění sklon ekliptiky a poloha světového pólu. Větší změny jsou však u rovníkových souřadnic druhého



Obrázek 74: Znázornění změn souřadnic vlivem precesního pohybu.

druhu, které jsou důležité pro nalezení objektu a jsou vztaženy k určitému času (ekvinokciu). Přibližné vztahy pro změnu v rektascenzi a deklinaci můžeme vyjádřit

$$\begin{aligned}\Delta\alpha &= [m + n \tan \delta \sin \alpha] \Delta T \\ \Delta\delta &= [n \cos \alpha] \Delta T,\end{aligned}\quad (250)$$

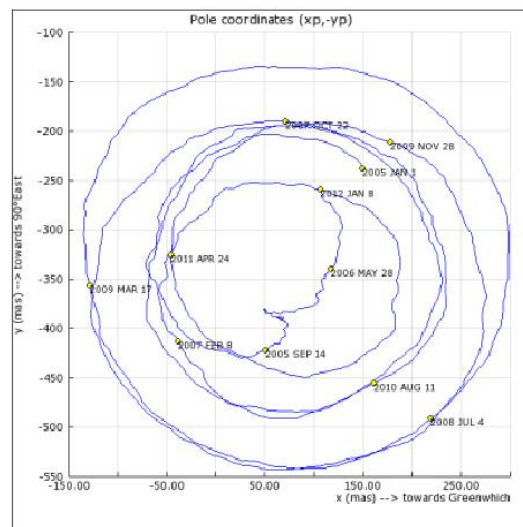
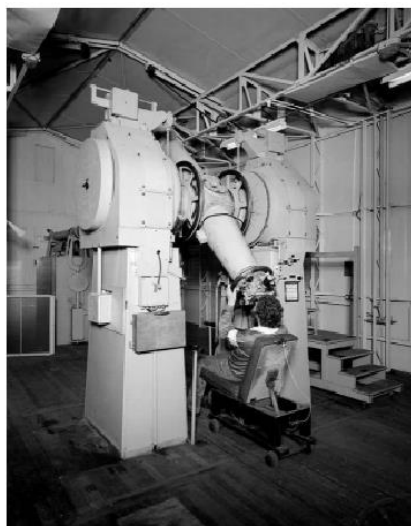
kde konstanta roční změny v rektascenzi je pro rok 2012 $m = 46,1250''$ a roční změna v deklinaci pak $n = 20,0407''$. Lunisolární precese způsobí posun jarního bodu ν_0 do bodu B (viz obr. 74), čemuž odpovídá pouze jeho posun po ekliptice. Planetární precese pak má za následek další posun jarního bodu z místa B do nové pozice ν (posun pouze po rovníku), což lze přepsat do rovnic

$$\begin{aligned}n &= p_{LS} \sin \varepsilon \doteq 20,0''/\text{rok} \\ m &= p_{LS} \cos \varepsilon - p_{PL} \doteq 46,1''/\text{rok}.\end{aligned}\quad (251)$$

Měření se ovšem vztahují k zidealizovanému střednímu pólu, jehož poloha je však proměnná a osciluje kolem středního pólu v důsledku nutace (nutační elipsa). S tím souvisí změna polohy jarního bodu i změna sklonu ekliptiky k rovníku a vše závisí na úhlové vzdálenosti výstupného uzlu Ω měsíční dráhy od jarního bodu. Změny ekliptikální délky a sklonu ekliptiky způsobené nutací můžeme určit ze vztahů

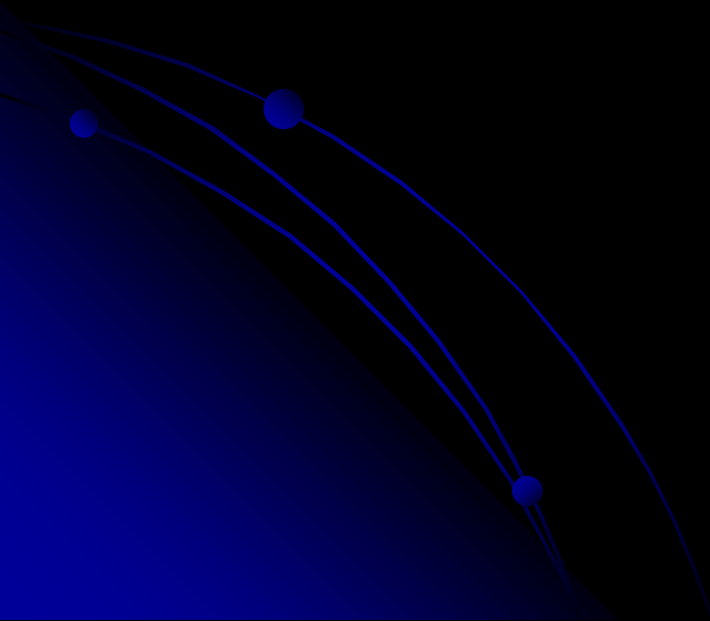
$$\begin{aligned}d_\lambda &= -17,24'' \sin \Omega \\ d_\varepsilon &= 9,21'' \cos \Omega.\end{aligned}\quad (252)$$

Kromě precese a nutace vykonává zemská osa i jemnější pohyby, které lze zjistit měřením tranzitů hvězd místním poledníkem např. pomocí pasážníku (meridiánový dalekohled), respektive dnes pomocí interferometrických měření kosmologických rádiových zdrojů pomocí VLBI. Pohyb osy se jeví jako kvaziperiodické obíhání s amplitudou asi $0,3''$, což odpovídá 15 m v průmětu na zemský povrch (viz obr. 75). Na datech je patrná přibližná Chandlerova perioda 430 dní. Příčina těchto pohybů není přesně známá, pravděpodobně se na nich podílejí endogenní procesy (přesuny hmot uvnitř Země), interakce Země s atmosférou, časově proměnné slapy Měsíce apod.

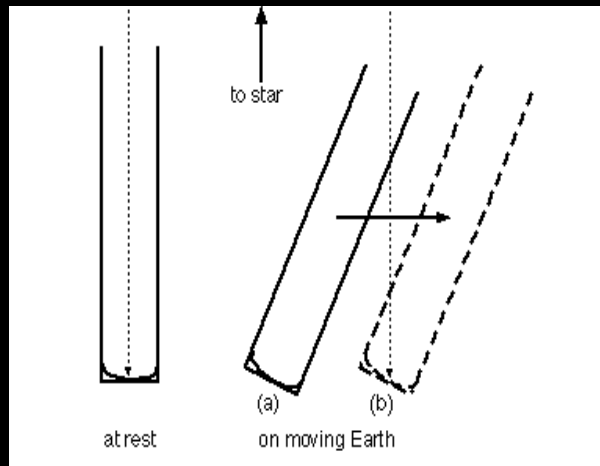


Obrázek 75: Vlevo je pasážíkový dalekohled na observatoři v Greenwichi umístěný na nultém poledníku [E38] a vpravo je pak zachycen pohyb severního světového pólu od roku 2005 do roku 2012 [E39].

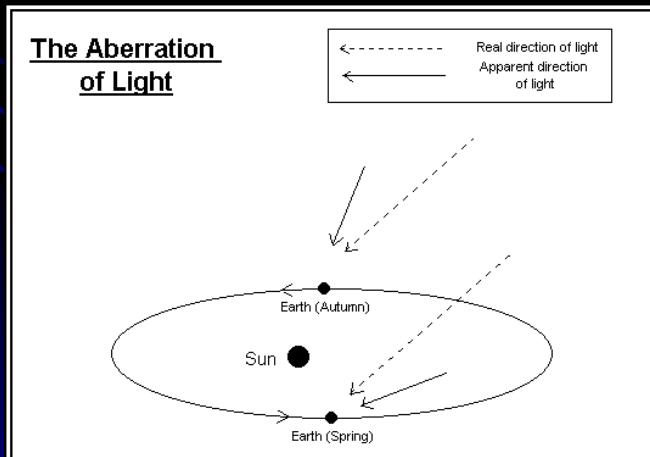
Starší prezentace



aberrace



- je důsledkem konečné rychlosti světla
- jistou analogií je např. vhození tenisového míčku do otevřeného okna stojícího automobilu a automobilu, který se pohybuje určitou rychlostí nebo směrem, ve kterém držíme deštník za deště pokud stojíme a směrem, pokud se dáme do pohybu



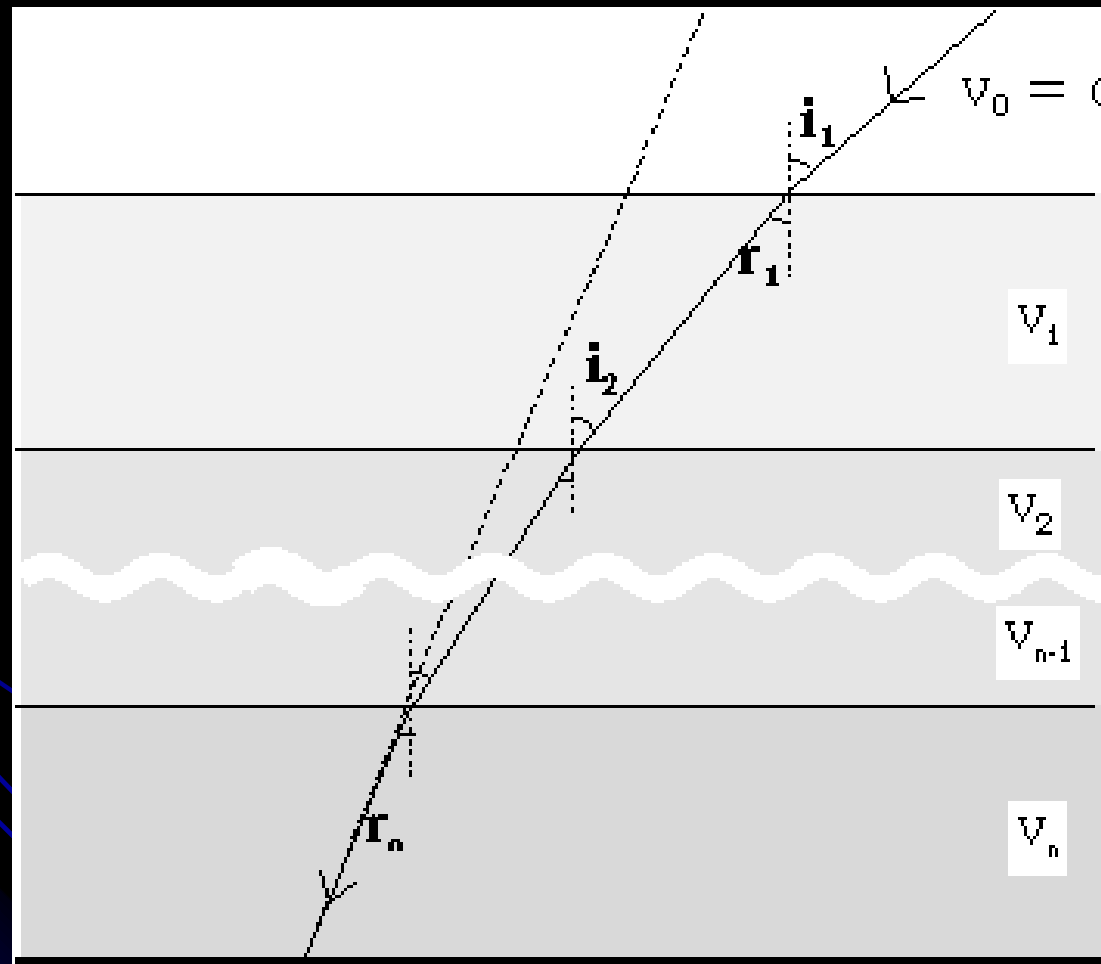
aberrace

- „úhel odklonění“, α , je závislý pouze na rychlosti pohybu míčku a auta nebo chodce a deště, obdobně to platí pro pozorovatele stojícího na pohybující se Zemi a záření, které k nám přichází od hvězdy
- apex - je okamžitý směr, ve kterém se Země pohybuje. Velikost rychlosti - cca 30 km/s.
- aby se tedy hvězda dostala do středu zorného pole dalekohledu, je nutno jej sklonit k apexu o úhel α , jež je závislý na:
 - rychlosti Země v
 - rychlosti světla c
 - úhlu β , což je úhlová vzdálenost hvězdy od apexu
- maximum nastane pro $\beta = 90^\circ$, protože $\tan \alpha = (v/c) \cdot \sin \beta$
- numericky pak $v/c = 10^{-4}$ a pak $\alpha = 20,47'' \cdot \sin \beta$, kde $20,47''$ je maximální hodnota aberrace
- tuto tzv. roční aberraci objevil Bradley (1727) při snaze změřit paralaxu
- rotace Země kolem své osy má za následek denní aberraci, jež dosahuje maximální hodnoty pro pozorovatele na rovníku (asi $0,3''$)

astronomická refrakce

- lom světla na rozhraní dvou prostředí - důležitý jev pro veškerá astronomická pozorování prováděná ze zemského povrchu
- platí známý vztah: $(\sin \alpha_1 / \sin \alpha_2) = (n_2 / n_1)$, kde α_1 a α_2 jsou úhly v prostředí 1 a 2 a n_1 a n_2 příslušné indexy lomu
- pro průchod atmosférou platí, že na ni lze pohlížet jako na vícevrstevné prostředí, kdy na každém přechodu dochází k lámání světla ke kolmici, protože hustota atmosféry směrem k povrchu Země roste, jev se nazývá astronomická refrakce

astronomická refrakce



astronomická refrakce

- maximální vliv je u obzoru, minimálně se projeví v zenitu, pokud označíme pozorovanou zenitovou vzdálenost objektu Z , pak skutečná je $Z_0 = Z + R$, kde R je úhel refrakce
- platí $\sin(Z+R) = n \cdot \sin Z$ a pro malá R pak $\sin Z \cdot \cos R + \cos Z \sin R = n \sin Z$
- navíc můžeme položit $\cos R = 1$ a $\sin R = R$
- čili pak $R = (n-1) \cdot \text{tg } Z$
- pro normální atmosférický tlak a $T = 0^\circ \text{ C}$ je index lomu vzduchu $n = 1,000\ 293$ a pouhá náhoda dává shodu, že $n - 1 = 0,000\ 293$ je rovno číselně $1'$ vyjádřené v radiánech, což umožňuje pro malé úhly $\text{tg } Z = R$ v obloukových minutách, čili pro $Z = 45^\circ$ je $R = 1'$.
- refrakce uspoší východ a opozdí západ objektů o několik minut!
- nutno uvážit, že $R = f(n) = f(\lambda)$, červené světlo je ovlivněno méně
- refrakce má vliv i na tvar slunečního nebo měsíčního kotouče při V nebo Z

astronomická refrakce

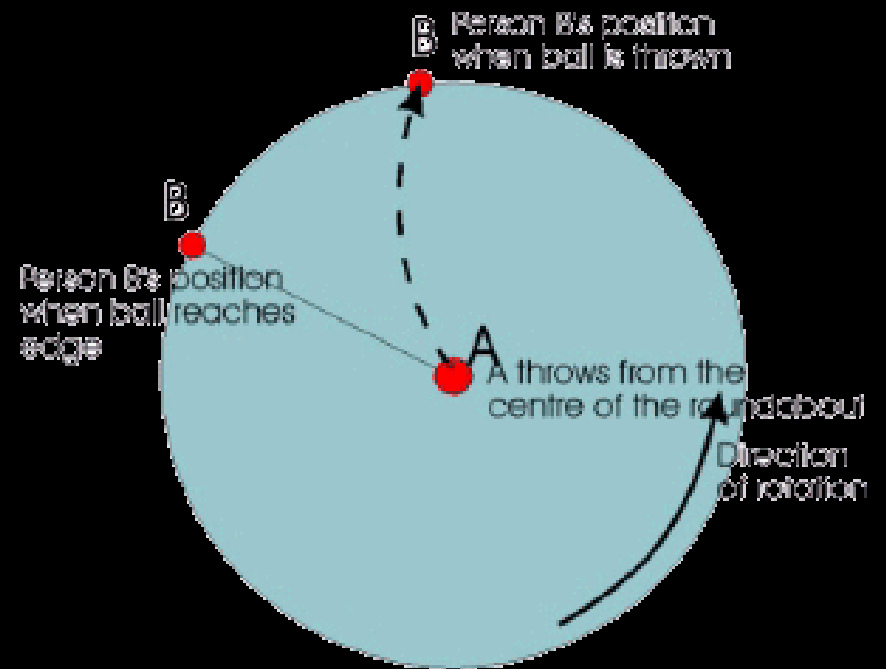
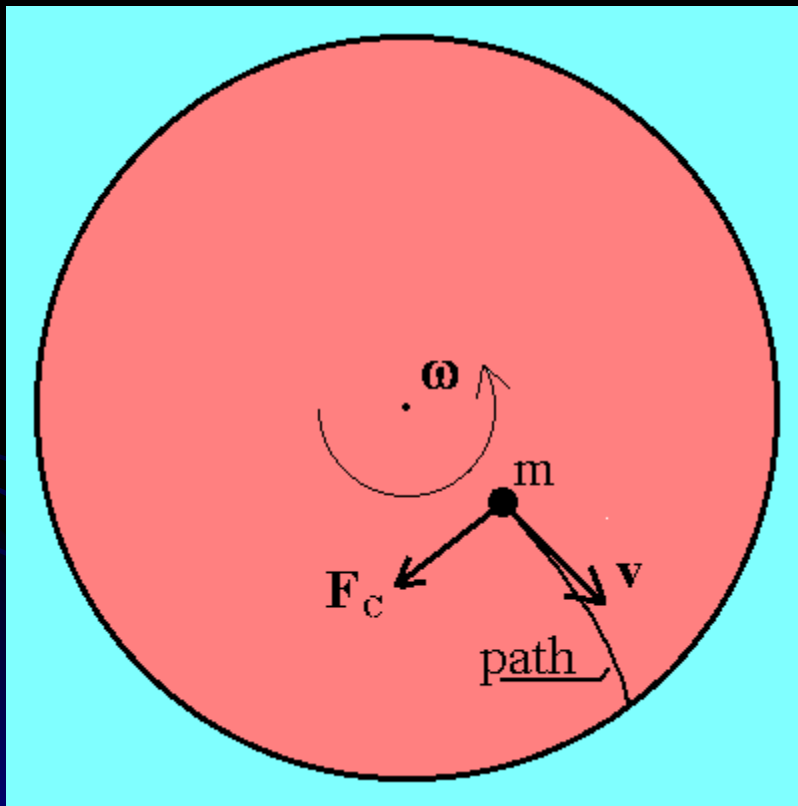
Tabulka:

	Zenitová vzdálenost ($90^\circ - \delta$)	Refrakce
•	0°	0,0'
•	10°	0,2'
•	20°	0,4'
•	30°	0,5'
•	40°	0,8'
•	50°	1,1'
•	60°	1,7'
•	70°	2,6'
•	80°	5,3'
•	85°	9,9'
•	90°	34,4'

pro $p = 1,013 \cdot 10^5$ Pa, 0 m n.m. a $T = 0^\circ$ C

Coriolisova síla

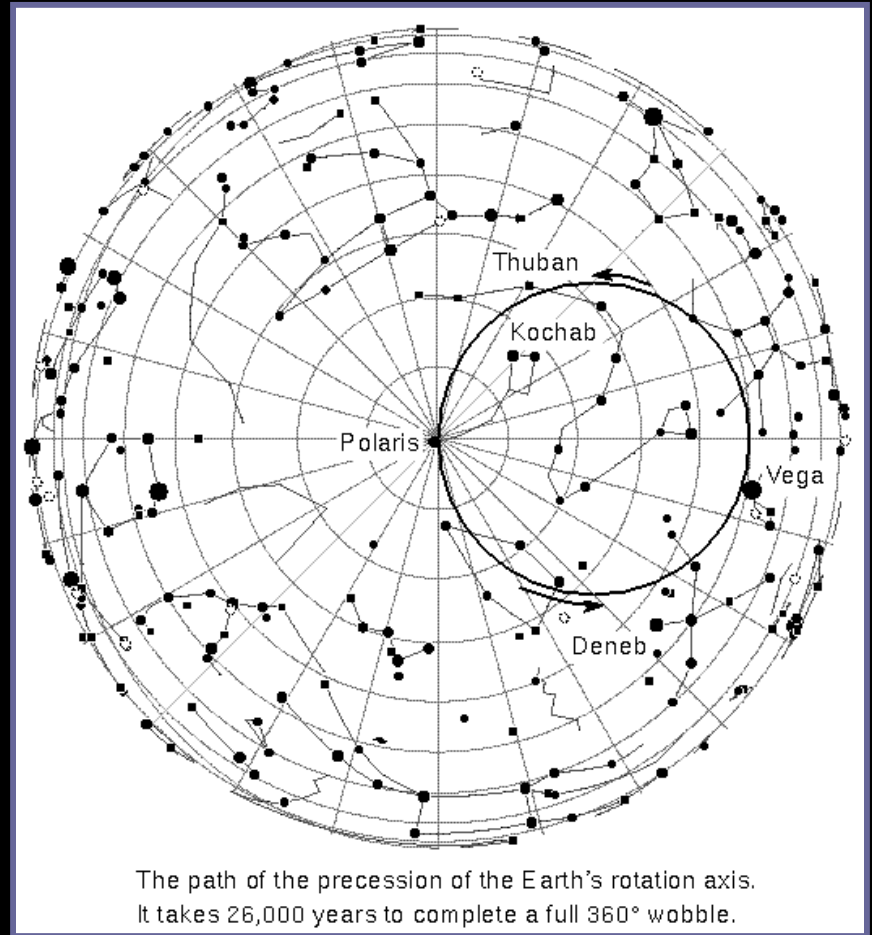
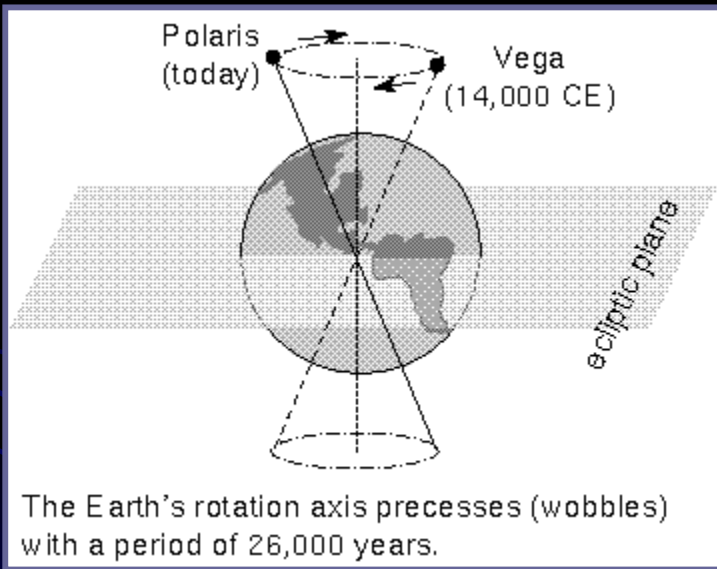
- při pohybu tělesa ve směru místního poledníku se jeho dráha vlivem rotace Země odchyluje na západ (pohyb od S k J), na východ (pohyb od J k S).
- vysvětlení jevu - 1835 G. G. Coriolis, okamžitá rychlost rotace závisí na zeměpisné šířce φ a platí $0,46 \text{ [km s}^{-1}] \cdot \cos \varphi$
- analogie s kuličkou pohybující se od středu rotující gramofonové desky
- pohybuje-li se hmotný bod od středu desky rychlostí \underline{v} směrem k okraji, k bodu \mathbf{B} ve vzdálenosti \underline{r} od středu, kam by dospěl za čas \underline{t} , kdyby kotouč nerotoval
- rotuje-li kotouč ω , posune se \mathbf{B} na \mathbf{B}' po dráze $d\mathbf{s} = \mathbf{r} \omega dt$ a protože $d\mathbf{r} = \mathbf{v} \cdot dt$, pak $\mathbf{s} = \mathbf{v} \omega t^2$
- pozorovatel na kotouči v místě \mathbf{B} by však pozoroval, že na hmotný bod v pohybu působí zrychlení kolmé k průvodiči a dráhu popíše jako $\mathbf{s} = \frac{1}{2} \mathbf{a}_{\text{cor}} t^2$, kde \mathbf{a}_{cor} bude tzv. Coriolisovo zrychlení, které je způsobeno Cor. silou $\mathbf{a}_{\text{cor}} = 2\mathbf{v} \cdot \omega$
- důsledky: stáčení vzdušných proudů na Zemi, nerovnoměrné vymílání břehů řek tekoucích SJ směrem, stáčení roviny kyvu tzv. Foucaultova kyvadla (perioda jeho stáčení je $P = 24/\sin \varphi$, kde φ je zem. šířka)
- <http://fyzweb.cuni.cz/dilna/krouzek/k27.htm>



precese a nutace

- objev precese je přisuzován Hipparchovi, její kvantitativní určení však bylo nepřesné
- dnešní hodnota je cca $50''$,256/rok, čili 1° za 72 let
- fyzikální vysvětlení podal až Newton a jeho gravitační zákon
- Země - velký setrvačnick, na který působí rušivé síly (gravitační působení Slunce a Měsíce), osa rotace pak vykonává po plášti kužele pohyb, který závisí na momentu setrvačnosti a velikosti rušivých sil, tzv. precesní pohyb
- vliv působení gravitace Měsíce - tzv. nutace, což je „zvlnění“ precesního pohybu s periodou 19 let, perioda precese je zhruba 26 000 let
- důsledkem je také posun jarního a podzimního bodu, resp. změna orientace průsečnice roviny světového rovníku a roviny ekliptiky v prostoru
- pro změny polohy jarního bodu určujeme:
 1. ***precese lunisolární***
 2. ***precese planetární***
 3. ***celková precese***

precese a nutace



precese a nutace

kvantitativně:

- 1. $p_{ls} = 50'',371/\text{rok}$
 - 2. $p_{pl} = -0'',125/\text{rok}$ a zmenšuje sklon ekliptiky o $0'',47/\text{rok}$
 - 3. celková precese $p = p_{ls} - p_{pl} \cos e$, kde e je sklon ekliptiky
-
- celková precese
 - v deklinaci $n = p_{pl} \sin \varepsilon = 20'',047/\text{rok}$
 - v rektascenzi $m = p_{pl} \cos \varepsilon - p_{pl} = 46'',085/\text{rok}$
 - roční změna polohy hvězdy důsledkem precese bude:
 - $\Delta \alpha/\text{rok} = m + n \operatorname{tg} \delta \sin \alpha$
 - $\Delta \delta/\text{rok} = n \cos \alpha$
 - pro přesná měření je nutno uvážit i sekulární variace ε a p

precese a nutace

nutace

- rovina měsíční dráhy svírá s ekliptikou úhel 5° , gravitační vliv Slunce způsobuje precesní pohyb této roviny s periodou 18,6 let, skutečný pól pak opisuje vlivem precese a nutace jakousi vlnovku

polohy hvězd:

- **skutečně pozorované** - oprava o denní aberaci + refrakce
- **pravá místa** - sk. pozor. + oprava o roční aberaci a paralaxu
- **střední místa** - pravá místa + oprava o nutaci a precesi, vztaženo k jistému datu, tzv. ekvinokciu (např. 2000.0).

konééc ??

