

Rotace Země a její sledování

Cyril Ron, Astronomický ústav AV ČR, Praha

- Rotace a čas, teorie,
- Referenční soustavy a transformace,
- Pozorování rotace Země– OA, VLBI, GPS, SLR,
LLR, DORIS,...
- Výsledky, aplikace,...

rotace Země a čas

- čas v astronomii = záznam děje, tj. přiřazení časových údajů jednotlivým jevům: čas průchodu poledníkem, zákrytu, zatmění => požadavek na měření času a udržování času
- pomocí periodických a diskrétních jevů (astronomické úkazy)
- pomocí nepřetržitého s měřitelného procesu (hodiny)
- **požadavek na rovnoměrnost**
- nutno definovat počáteční okamžik (epochu) a časovou jednotku.
- do 50 let 20. století – čas (přesný) určován astronomicky
- později fyzikálně – (kmitání křemíkového krystalu, přechody mezi hladinami Ce_{133})

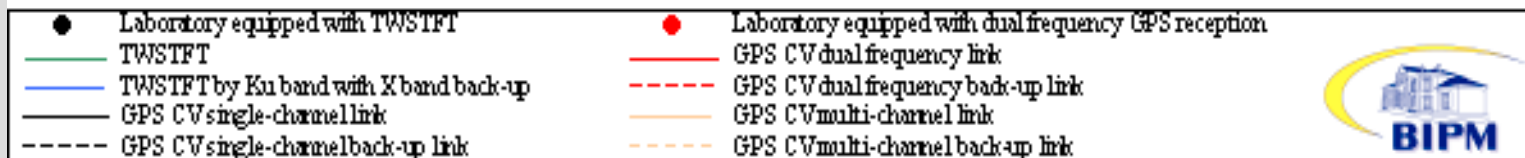
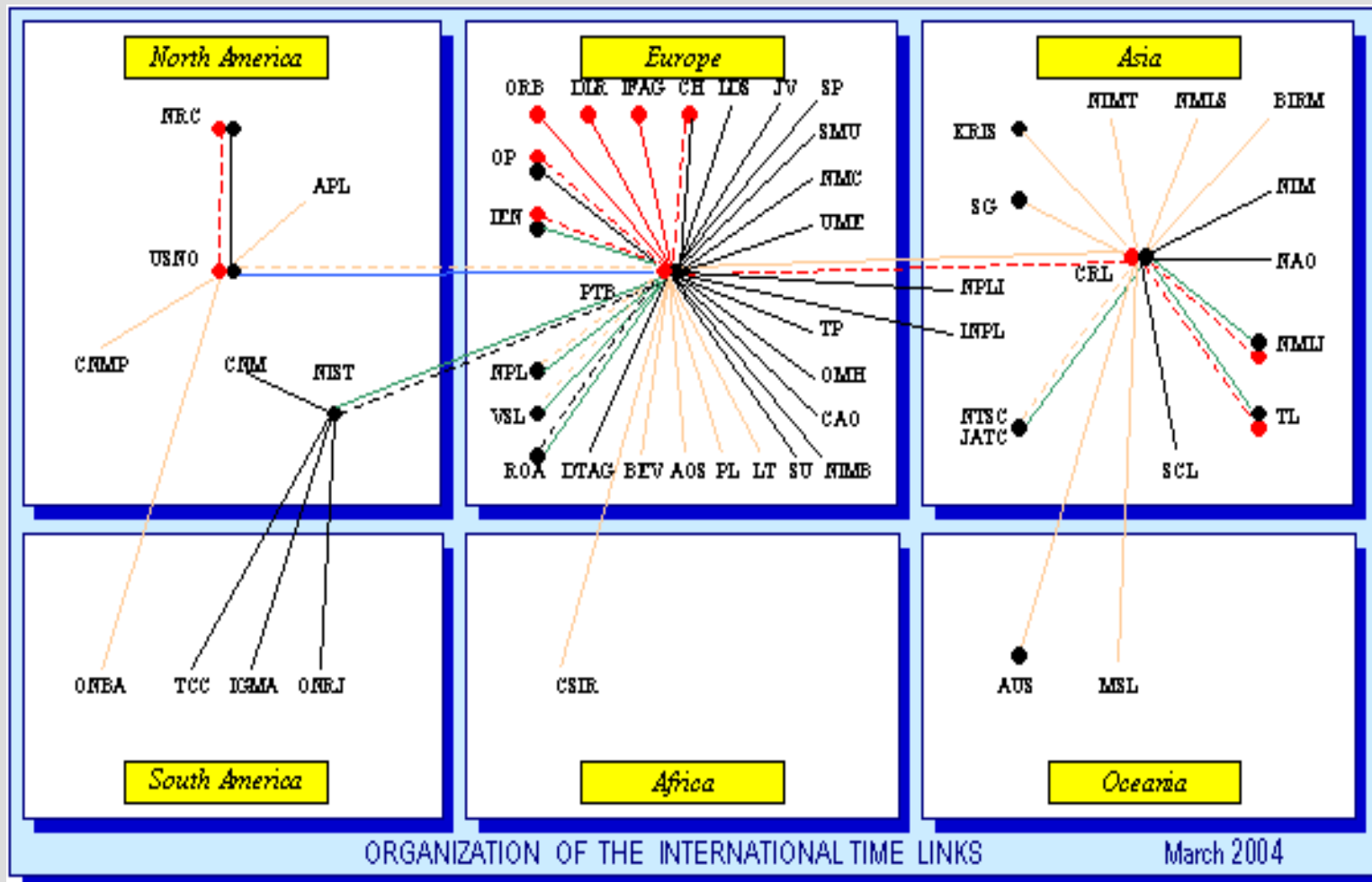
rotace Země a čas

- odvozen z rotačního pohybu Země, nerovnoměrný
- do 50-tých let nebylo nic přesnějšího,
- nyní slouží k popisu nepravidelností rotační rychlosti Země,
- **časy hvězdné**
- **časy sluneční**

Čas definovaný fyzikálně

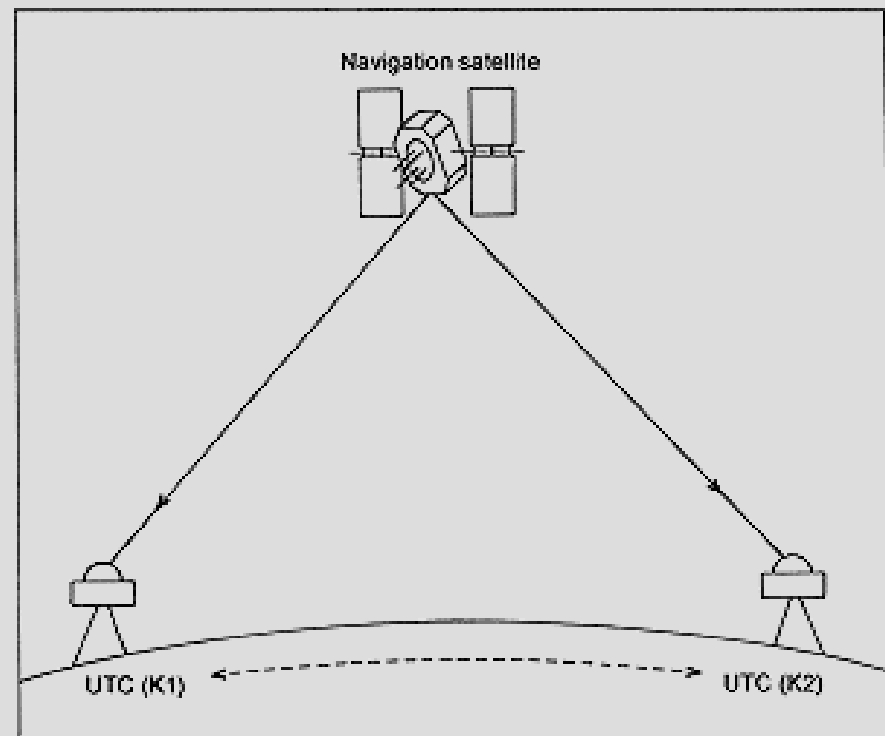
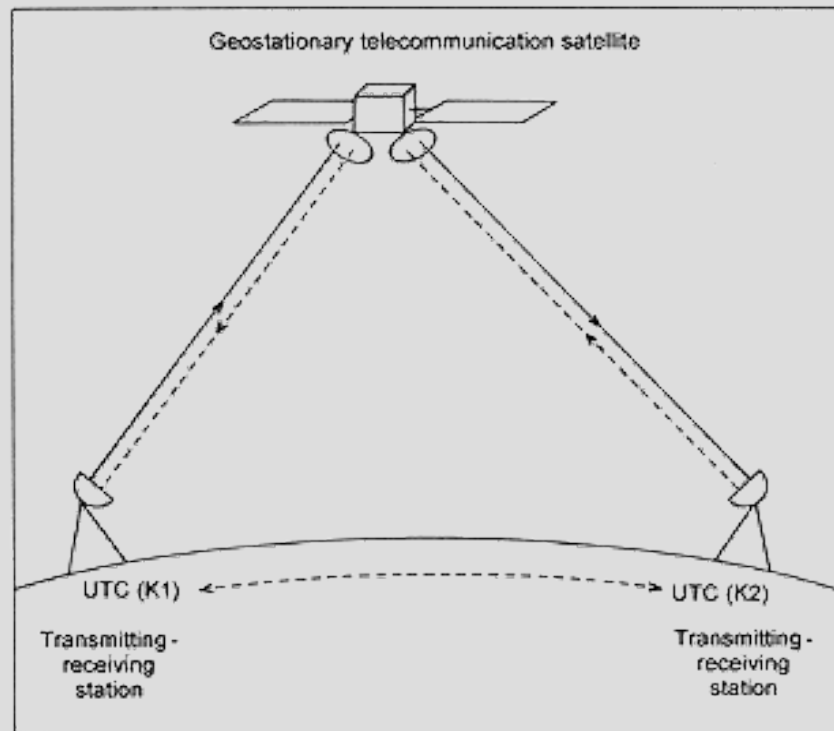
- Atomový čas, atomová sekunda (BIPM 1967): doba 9 192 631 770 kmitů atomů Ce_{133} při přechodu mezi vybranými hladinami základního stavu
- vteřina atomového času je odvozena od tzv. efemeridové vteřiny, která jako zlomek tropického roku je odvozena z oběhu Země a planet kolem Slunce x **ne z rotace Země kolem osy!** => atomový čas se rozchází s časem určeným právě z pozorování rotace Země.
- Realizace atomového času, atomové hodiny (HP), cesiové,
- Systém mezinárodního atomového času TAI
- v roce 2004 systém více než 200 atomovými hodinami z 50 laboratoří (v Čechách 2 v ÚRE) z 30 zemí

TAI



srovnání hodin

- TWSTFT, GPS, převoz hodin – nutno uvažovat relativistické odchylky – (pohybující se hodiny, nadmořská výška => různá rychlost....)

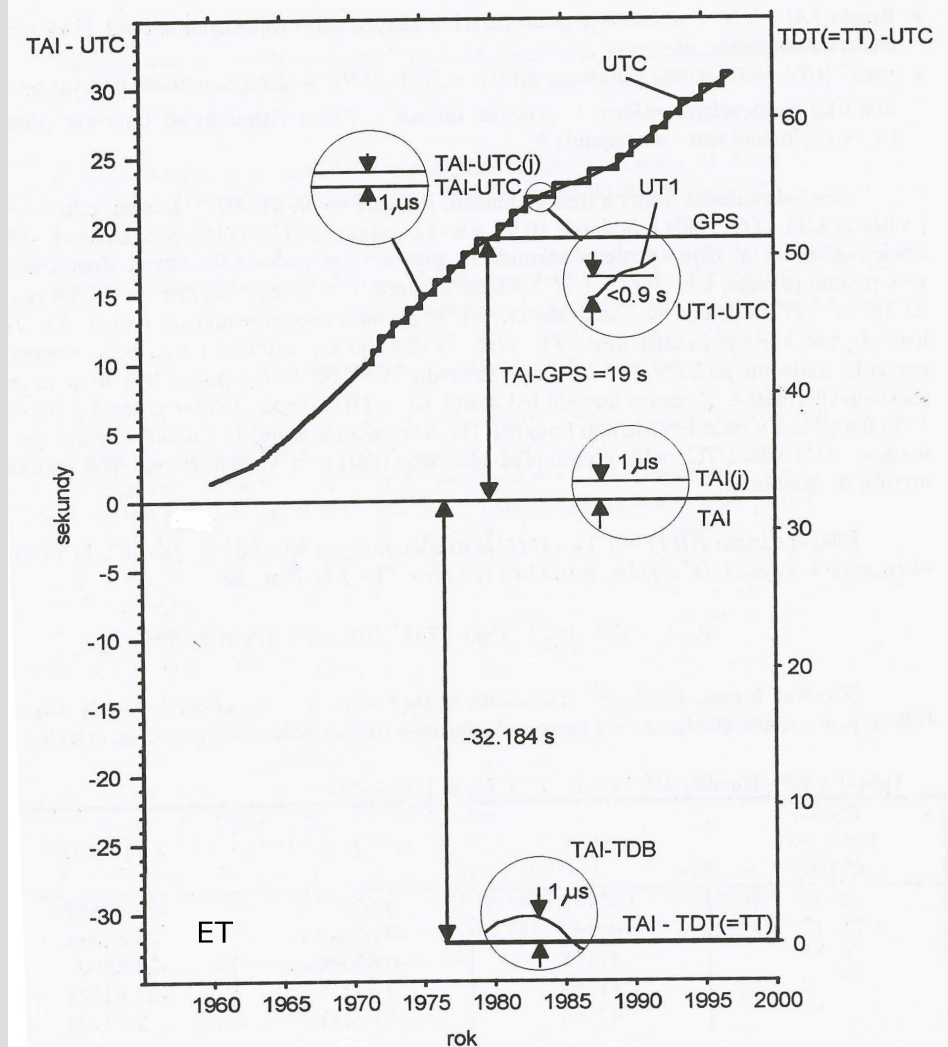


Univerzální časy (UTx)

- UT0 – určuje se z pozorování (hlavně VLBI, GPS, SLR, LLR, do 80. let optická astrometrie – GEA) – je vázán na rotaci Země a na místo pozorování.
- UT1 – tzv. rotační čas, světový čas, je vázán na rotaci Země. Ve škále rovnoměrného atomového času není rovnoměrný, tj. odráží nerovnoměrnosti rotace, sekulární zpomalování rotace. V časové škále UT1 však Země rotuje rovnoměrně. UT1 se určí z UT0 zavedením redukce na střední polohu pólu $UT1 = UT0 - \Delta\lambda_p$,
- UT2 – tzv. prozatímní rovnoměrný čas $UT2 = UT1 + \Delta T_s$, oprava o sezónní variace rotace Země, po zavedení TAI nemá využití,
- UT1R = UT1 + oprava z vlivu slapů s periodou kratší než 35 dnů

UTC

- Země rotuje nerovnoměrně
- rotace se zpomaluje
- UT1 a TAI se rozchází
- zaveden UTC = koordinovaný univerzální (světový) čas
- $|\text{UT1} - \text{UTC}| < 0.9\text{s}$
- vkládá se přestupná sek.
- 30.6. nebo 31.12.
- 23:59:59
- 23:59:60 31.12.
- 0:00:00 1. 1.
- rozdíl $\text{DUT1} = \text{UT1} - \text{UTC}$ je uváděn v Bulletine IERS
- naposledy 1.1.1999 (+32s)



Dynamické časy

- **Efemeridový čas** ET – odvozen z dynamiky pohybu planet sluneční soustavy. Počítá se od roku 1900, kdy byla definována efemeridová sekunda. Navázal na něj TAI (délkou sekundy)
- **Terestrický čas** TT – nezávislý argument pohybových rovnic nebeské mechaniky (Slunce, planety), délka sekundy odpovídá TAI. Platí od roku 1977. $TT = TAI + 32.184 \text{ s}$
 $\Delta T(A) = TT - UT1 = TAI + 32.184 - UT1 =$
 $= TAI + 32.184 - (UTC + DUT1)$. Pro TT jsou tabelovány polohy těles v ročenkách – proto rozdíl na UTC~SEČ nemůže být zanedbán
- **GPS** = $TAI - 19 \text{ s}$, nulový rozdíl GPS-UTC v tzv. standardní epoše GPS 6.1.1980
- **Barycentrický dynamický čas**, TDB, teorie relativity, rozdíl TT-TDB je pro praktické účely zanedbatelný.

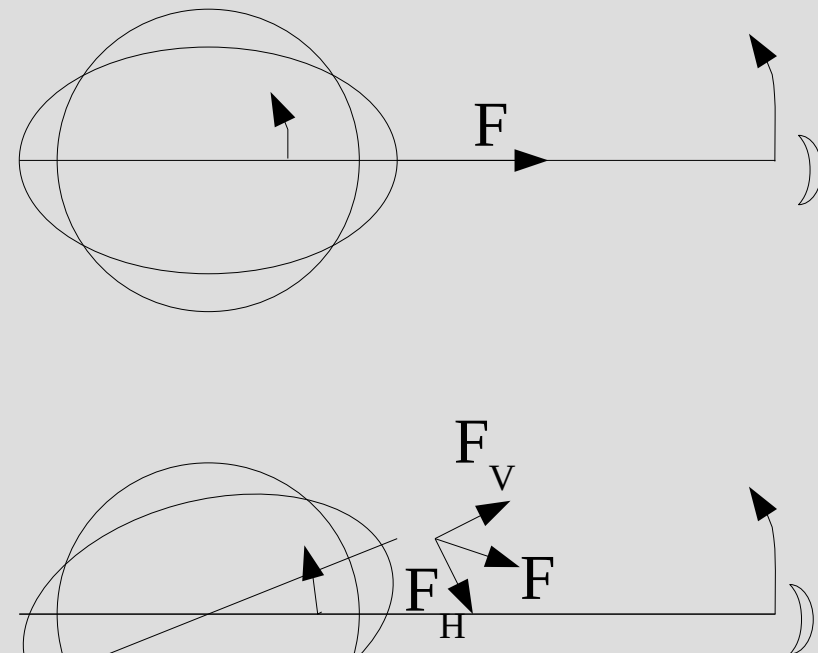
$$TDB = TT + 1339.636(MJD - 43144) + 1658 \sin g + 14 \sin 2g$$
$$g = 357.53 + 0.9856003(MJD - 51544)$$

Rotace Země v geologických obdobích

TABLE 8.1 Paleontological and paleosedimental data of the length of the day (l.o.d) for the Phanerozoic and for the Proterozoic

Reference	Time BP (Ma)	Rotation period T	Type of the used data
1	0	24.0	Present value
2	0	24.4	Bivalves
3	85	23.6	Bivalves
4	90	23.7	Bivalves
5	230	23.6	Bivalves
6	320	22.9	Bivalves
7	360	22.8	Corals
8	375	22.0	Corals
9	385	22.0	Bivalves
10	395	21.6	Brachiopods
11	405	21.4	Corals
12	405	22.0	Corals
13	415	21.7	Bivalves
14	470	21.9	Corals
15	470	20.9	Brachiopods
16	490	20.8	Corals
17	515	21.3	Corals
18	570	21.1	Stromatolites
19	595	21.4	Stromatolites
20	650	21.9	Elatina formation
21	930	20.3	Stromatolites
22	940	21.2	Stromatolites
23	1790	19.9	Stromatolites
24	1800	19.8	Stromatolites
25	2000	19.9	Stromatolites
26	2500	19.7	Weeli Wolli formation

Varga (1996)



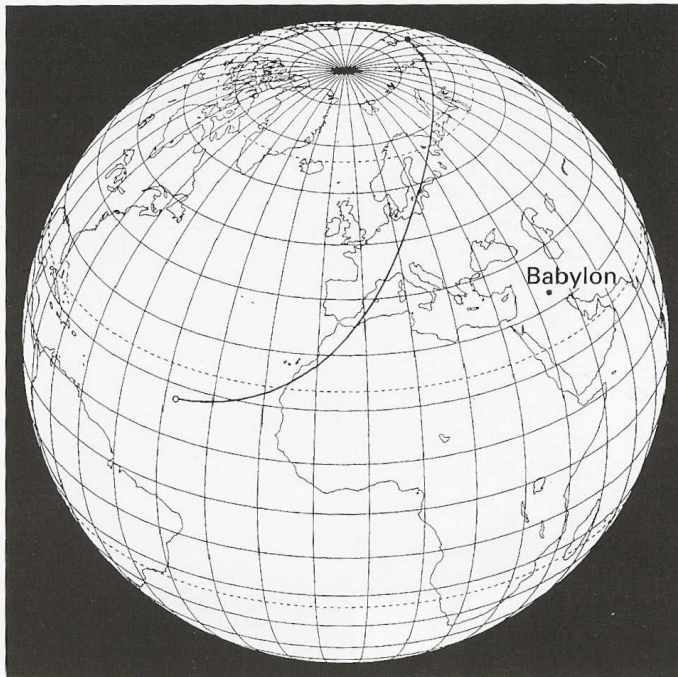
Slapové tření F_H

Pozorovaná zatmění v historických dobách

Zóna totality zatmění Slunce 136 BC

(a)

$\Lambda = 4.3^\circ \text{ W}$

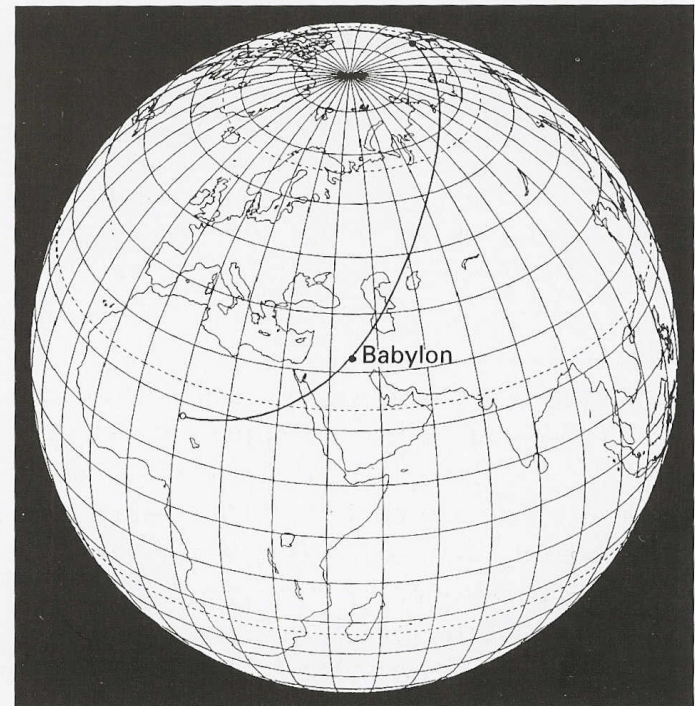


$\phi = 32.1^\circ \text{ N}$

$$\Delta T = 0s$$

(b)

$\Lambda = 44.5^\circ \text{ E}$

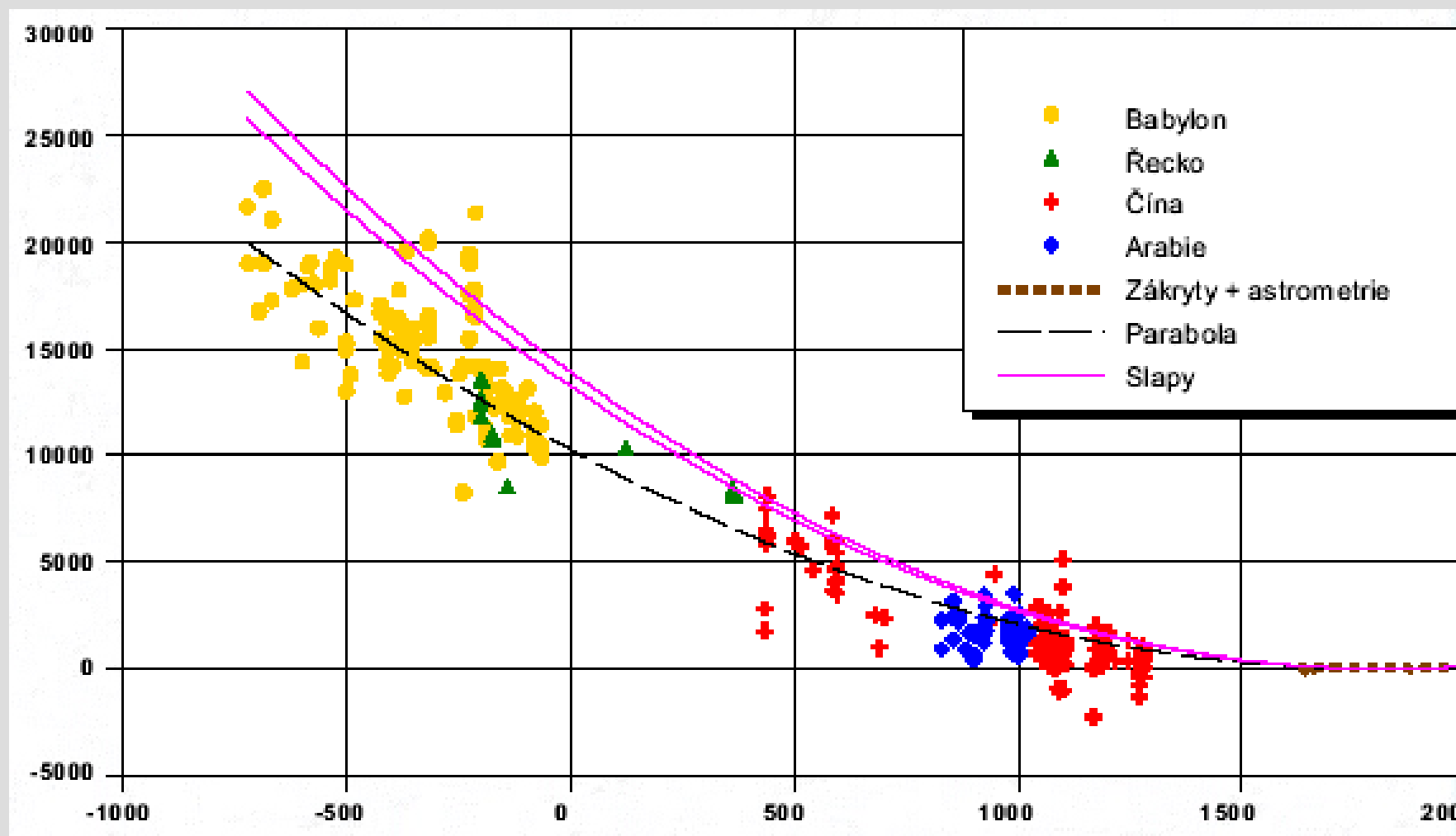


$\phi = 32.5^\circ \text{ N}$

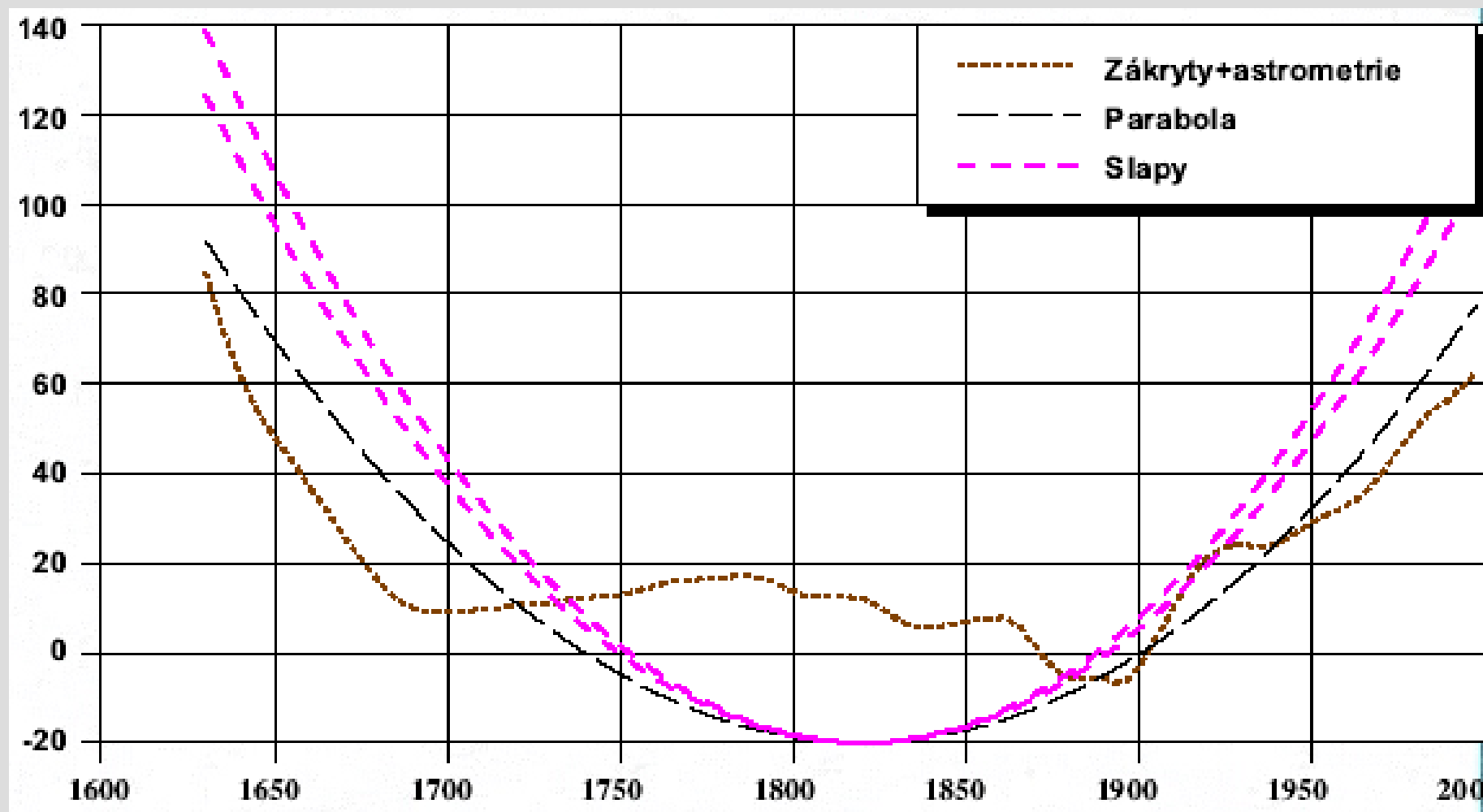
$$\Delta T = +11700s$$

Stephenson (1997)

ET-UT z pozorování zatmění, zákrytů a astrometrických pozorování



ET-UT z pozorování zákrytů hvězd Měsícem a astrometrických pozorování



Závěry z pozorování předteleskopické éry, potvrzené pozdějším pozorováním

Postupné zpomalování rychlosti rotace, způsobené slapovým bržděním

- Z působení slapů by vyplývalo rychlejší zpomalování rotace nežli pozorujeme
- Další působící efekt - pomalé zmenšování zploštění Země (hlavního momentu setrvačnosti), které naopak rychlost rotace urychluje. To je potvrzeno z pozorování SLR za posledních 20-30 let.
- 'postglacial rebound' - reakce na odledňování polárních oblastí.

Dekádové kvazioperiodické změny rychlosti rotace:

- Změny na rozhraní pláště a jádra - měnící se topografie, elektromagnetické vlivy...

Rotace Země

- celková orientace tělesa tj. precese-nutace, pohyb pólu, vlastní rotace je ovlivňována:
- vnějšími vlivy (Měsíc, Slunce, planety)
- vnitřními vlivy (vnitřní stavba Země, přesuny hmot v atmosféře a hydrosféře, na rozhraní pláště a jádra...)
- precesí (2.stol.př.n.l Hipparchos), nutací (Bradley pozoroval, Euler vysvětlil)
- pohybem pólu = pohyb vektoru rotace vůči soustavě spojené se Zemí, Euler (1765) předpověděl, Kuestner 1884 pozoroval.
- změnami rychlosti rotace (již Haley 1695 sekulární zpomalování pohybu Měsíce, observačně zjištěny sezónní variace až v 1. pol. 20.stol.)

Rotace Země

- zásadní význam pro transformaci mezi nebeskou a terestrickou soustavou, kosmickou navigaci, geofyziku, geodézií,...
- vztah rotace Země a času
- studium rotace Země = hledání časově proměnného vztahu mezi terestrickou (rotující) a nebeskou (inerciální) souřadnou soustavou

Parametry orientace Země

The diagram illustrates the Earth's orientation parameters within a yellow elliptical frame. A central globe shows the continents in green and oceans in light blue. A large black ellipse represents the ecliptic, labeled 'ekliptika' at the bottom left. A vertical line passes through the Earth's center and the celestial pole 'P'. A smaller circle 'E' represents the Earth's orbit around the Sun, with a period of '26000 let' (26,000 years) indicated. A small circle at the top right shows the Earth's axis wobbling in a circle, labeled '18,6 roku' (18.6 years). A blue arrow points from the celestial pole 'P' to the Earth's axis, labeled 'Precese + nutace (odchylky nebeského pólu)'. A blue arrow points from the Earth's axis to the Earth's center, labeled 'Vlastní rotace (UT1, délka dne)' (1 den). A blue arrow points from the Earth's center to the Earth's surface, labeled 'Pohyb pólu' (435 + 365 dní). The Earth's axis is labeled 'P_o'.

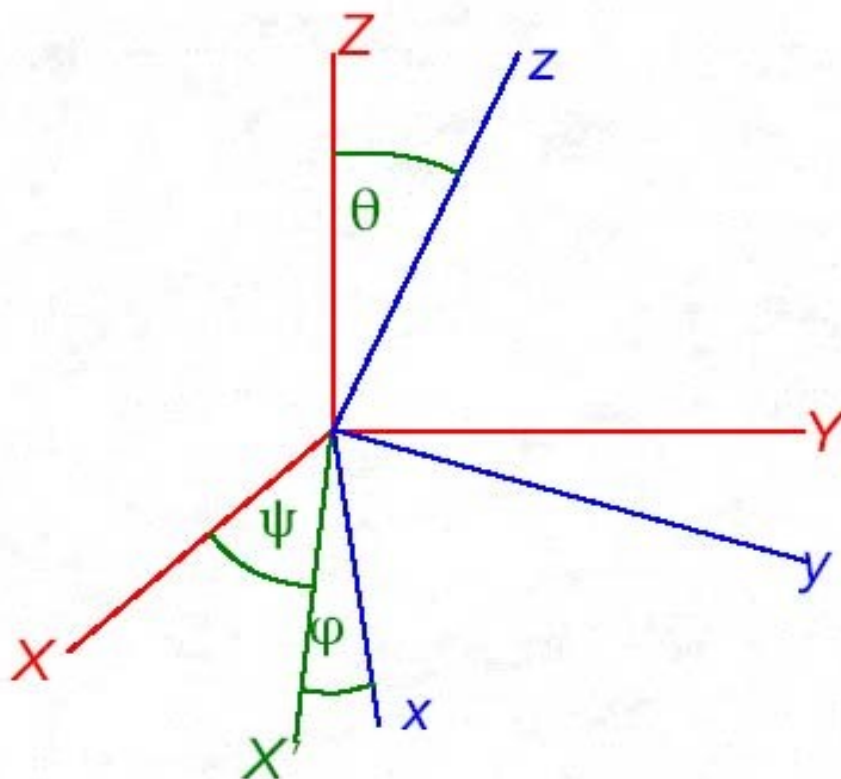
Eulerovy úhly

Rotace tuhé Země

Časově proměnný vztah mezi dvěma soustavami:

xyz - rotující, spojená se Zemí

XYZ - nerotující, vázaná na mimogalaktické objekty



Eulerovy úhly:

$-\psi$ precesní úhel

θ nutační úhel

ϕ úhel vlast. rotace

Postup řešení rotace Země

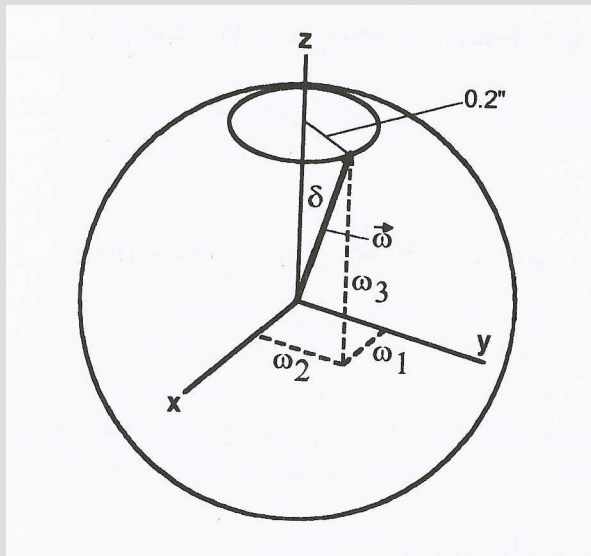
- rotace tuhé Země pod vlivem vnějších těles
- vlivy modelovatelných netuhých částí Země (elastický plášť, tekuté vnější jádro, tuhé vnitřní jádro) = frekvenčně závislá přenosová funkce
- špatně modelovatelné vlivy přesunů hmot Země (atmosféra, oceány, podzemní vody, změny na rozhraní pláště a jádra)

Teorie rotace Země - pohyb pólu

- Studujeme pohyb vektoru rotace vůči soustavě spojené se Zemí,
- nutno vyjít ze zákonů platných v rotující = **neinerciální (terestrické) soustavě**
- 2. impulsová věta: změna momentu točivosti = moment vnějších sil

$$\dot{\vec{H}} + \vec{\omega} \times \vec{H} = \vec{L}$$

$$\vec{H} = \mathbf{C} \vec{\omega} \quad \text{vektor momentu hybnosti}$$



hlavní momenty setrvačnosti

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} A & 0 & 0 \\ 0 & A & 0 \\ 0 & 0 & C \end{pmatrix}$$

$$A = \iiint_M (Y^2 + Z^2) dm,$$

$$C = \iiint_M (X^2 + Y^2) dm$$

EulEROVY DIFERENCIÁLNÍ ROVNICE

$$\begin{aligned}A \dot{\omega}_1 + (C - A) \omega_2 \omega_3 &= L_1 \\A \dot{\omega}_2 - (C - A) \omega_1 \omega_3 &= L_2 \\C \dot{\omega}_3 &= L_3\end{aligned}$$

pokud $L = 0$

$$\dot{\omega}_3 = 0 \rightarrow \omega_3 = \text{konst.} = \Omega$$

provedeme substituci σ_E je tzv. **Eulerova frekvence**

$$\sigma_E = \frac{C - A}{A} \Omega$$

$$\dot{\omega}_1 + \sigma_E \omega_2 = 0$$

$$\dot{\omega}_2 - \sigma_E \omega_1 = 0$$



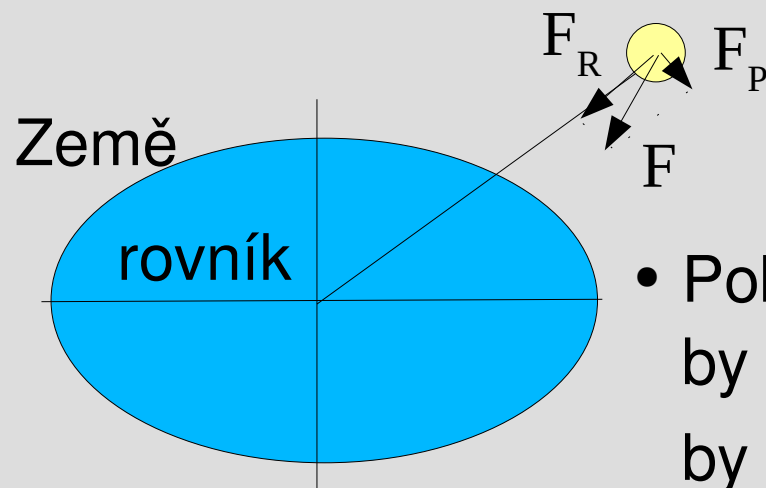
$$\omega_1 = k_1 \cos(\sigma_E t + k_2)$$

$$\omega_2 = k_1 \sin(\sigma_E t + k_2)$$

$$T = \frac{2\pi}{\sigma_E} = \frac{A}{C - A} \cdot \frac{2\pi}{\Omega} \approx 305 \text{ dnů}$$

Eulerova perioda není ve shodě s pozorovanou hodnotou => s modelem tuhé Země nevystačíme!

Moment vnějších sil



$$L = r \times F = r \times (F_R + F_P) = r \times F_P$$

- Pokud by byla Země homogenní koule, F by směřoval do středu Země a složka F_P by byla nulová a $L=0$
- F je přitažlivá síla $\propto \text{grad}(\text{potenciál } V_{\odot})$

$$V = G \int_M \frac{dM}{\rho}$$

- pro L vztažené k soustavě spojené s rotující Zemí:

$$L = L_1 + i L_2 = (C - A) \Omega^2 \sum_j B_j e^{-i(\omega_j t + \beta_j)}$$

$$L = r \times \text{grad } V$$

$$L = \begin{vmatrix} z \frac{\partial V}{\partial y} - y \frac{\partial V}{\partial z} \\ x \frac{\partial V}{\partial z} - z \frac{\partial V}{\partial x} \\ y \frac{\partial V}{\partial x} - x \frac{\partial V}{\partial y} \end{vmatrix}$$

řešení s momentem vnějších sil

$$A \Omega \dot{m}_1 + (C - A) \Omega^2 m_2 = L_1$$

$$A \Omega \dot{m}_2 - (C - A) \Omega^2 m_1 = L_2$$

$$C \Omega \dot{m}_3 = L_3$$

$$\dot{m} - i \sigma_E m = \Omega \sigma_E \sum_j B_j e^{-i(\omega_j t + \beta_j)}$$

$$m = m_0 e^{i \sigma_E t} + i \Omega \sum_j \frac{\sigma_E}{\omega_j + \sigma_E} B_j e^{-i(\omega_j t + \beta_j)}$$

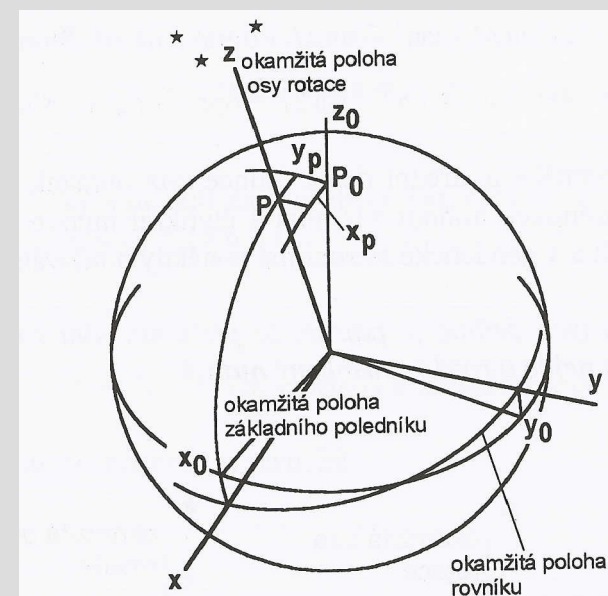
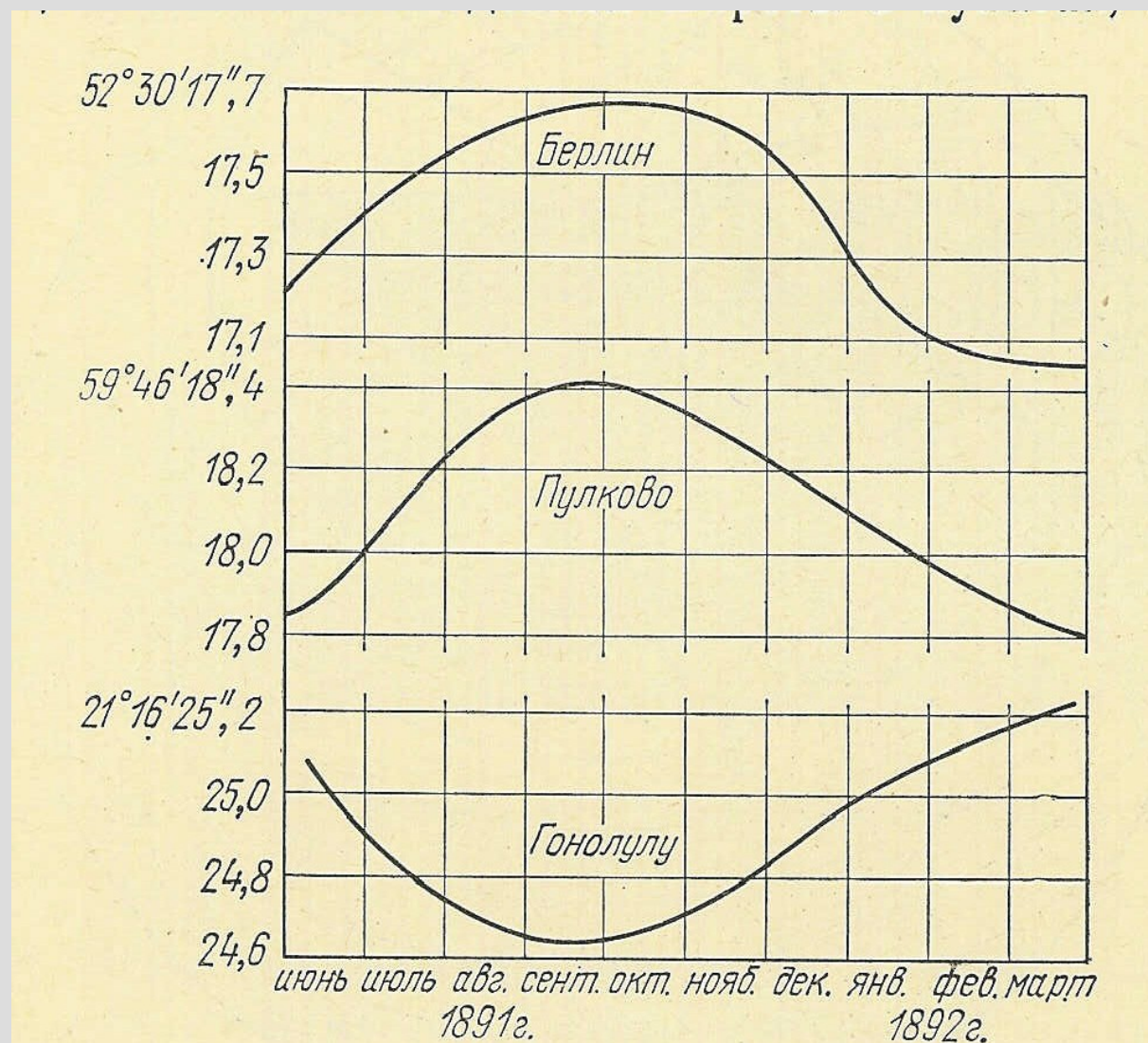

prográdní pohyb 0.4“

retrográdní pohyb s amplitudou 0.02“

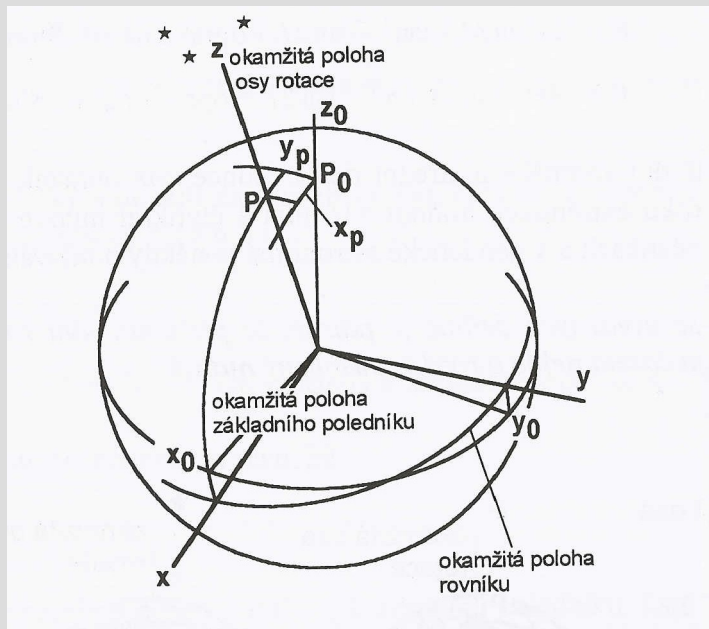
řešení s momentem vnějších sil

$$\dot{m} - i\sigma_E m = \Omega \sigma_E \sum_j B_j e^{-i(\omega_j t + \beta_j)}$$
$$m = m_0 e^{i\sigma_E t} + i\Omega \sum_j \frac{\sigma_E}{\omega_j + \sigma_E} B_j e^{-i(\omega_j t + \beta_j)}$$

Potvrzení pohybu pólu v r.1891



vliv pohybu pólu



pohyb pólu ovlivňuje zeměpisné souřadnice,
ale ne rovníkové souřadnice!!!

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \mathbf{X}(y_p) \mathbf{Y}(x_p) \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix}$$

$$x - x_0 = -x_p z_0, \quad y - y_0 = y_p z_0, \quad z - z_0 = x_p x_0 - y_p y_0$$

$$\varphi - \varphi_0 = x_p \cos \lambda_0 - y_p \sin \lambda_0$$

$$\lambda - \lambda_0 = (x_p \sin \lambda_0 + y_p \cos \lambda_0) \tan \varphi_0$$

Liouvillova diferenciální rovnice

Zemi nahradíme rotačně symetrickým elipsoidickým elastickým modelem => dochází nutně ke změně momentu hybnosti s časem $\mathbf{h}$ je relativní moment hybnosti vyjadřující tyto změny

$$\mathbf{H} = \underline{\mathbf{C}} \vec{\omega} + \mathbf{h} \quad \frac{d^T \mathbf{H}}{dt} + \vec{\omega} \times \mathbf{H} = \mathbf{L}$$

$$\frac{d^T (\underline{\mathbf{C}} \vec{\omega} + \mathbf{h})}{dt} + \vec{\omega} \times (\underline{\mathbf{C}} \vec{\omega} + \mathbf{h}) = \mathbf{L}$$

Liouvillova diferenciální rovnice

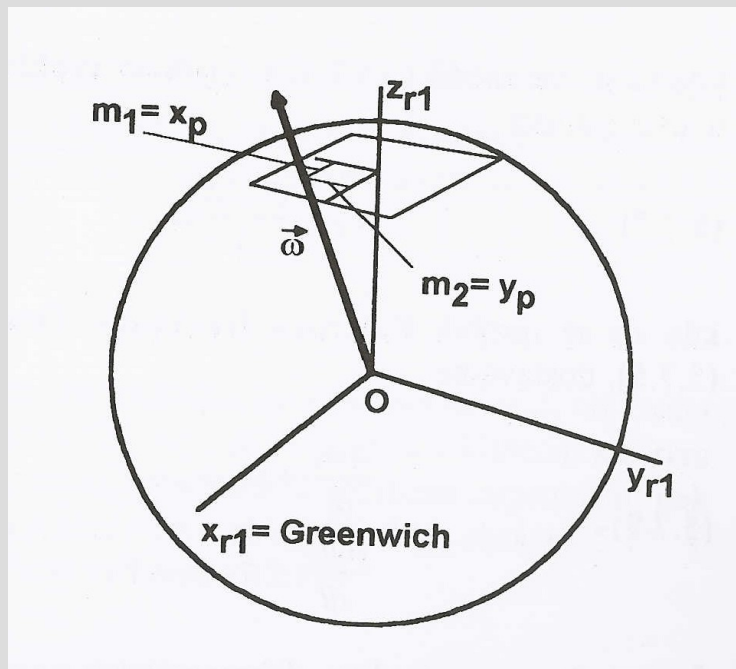
Tisserand: lze nalézt takovou souřadnou soustavu, kde $\mathbf{h} = 0$.

Částice Země dm mění svou polohu vůči tisserandovským osám => změna tenzoru setrvačnosti:

$$\underline{\mathbf{C}} = \underline{\mathbf{C}}_0 + \underline{\mathbf{c}}$$

$$\underline{\mathbf{C}}_0 = \begin{pmatrix} A & 0 & 0 \\ 0 & A & 0 \\ 0 & 0 & C \end{pmatrix}, \quad \underline{\mathbf{c}} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{pmatrix}, \quad \vec{\omega} = \vec{\omega}_0 + \delta \vec{\omega}, \quad \vec{\omega}_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \Omega \end{pmatrix}, \quad \delta \vec{\omega} = \begin{pmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \end{pmatrix} \Omega.$$

řešení Liovilleovy rovnice



složky m_1 a m_2 mají význam **souřadnic pólu** x_p a y_p ,
 m_3 vyjadřuje změnu rychlosti rotace

$$\begin{aligned} A \Omega \dot{m}_1 + (C - A) \Omega^2 m_2 + \Omega \dot{c}_{13} - \Omega^2 c_{23} &= L_1 \\ A \Omega \dot{m}_2 - (C - A) \Omega^2 m_1 + \Omega \dot{c}_{23} + \Omega^2 c_{13} &= L_2 \\ C \Omega \dot{m}_3 + \dot{c}_{33} \Omega &= L_3 \end{aligned}$$

$$m = m_1 + i m_2, \quad c = c_{13} + i c_{23}, \quad L = L_1 + i L_2$$

2. rovnici $\cdot i$, přičteme k 1. a dělíme $A \Omega$

$$\dot{m} = i \frac{C - A}{A} \Omega m + \frac{L}{A \Omega} - \frac{1}{A} \dot{c} - i \frac{\Omega}{A} c,$$

$$\dot{m} = i \sigma_E (m - \psi),$$

$$\psi = i \left[\frac{L}{(C - A) \Omega^2} - \frac{c}{C - A} - \frac{1}{(C - A) \Omega} \dot{c} \right],$$

$$\dot{m}_3 = \frac{L}{C \Omega} - \frac{1}{C} \dot{c}_{33}.$$

řešení Liouvillový rovnice

$$\dot{m} = i \sigma_E (m - \psi),$$

$$\psi = i \left[\frac{L}{(C-A)\Omega^2} - \frac{c}{C-A} - \frac{1}{(C-A)\Omega} \dot{c} \right],$$

$$\dot{m}_3 = \frac{L}{C\Omega} - \frac{1}{C} \dot{c}_{33}.$$

$$\sigma_C = \sigma_E \frac{1 - \frac{k}{k_s}}{1 + \frac{k}{k_s} \frac{\sigma_E}{\Omega}} = 430 \text{ dnů}$$

ψ obsahuje jak c , tak i L

- Vliv deformace Země způsobený změnou odstředivého zrychlení v důsledku pohybu pólu (zpětný efekt), Chandlerova frekvence 430 dní
- Vliv momentu sil působeného Sluncem a Měsícem na zploštělou Zemi,
- Vliv slapových deformací Země.
- $k = 0.3$, $k_s = \frac{3G(C-A)}{\Omega^2 a^5}$ Love-ova čísla

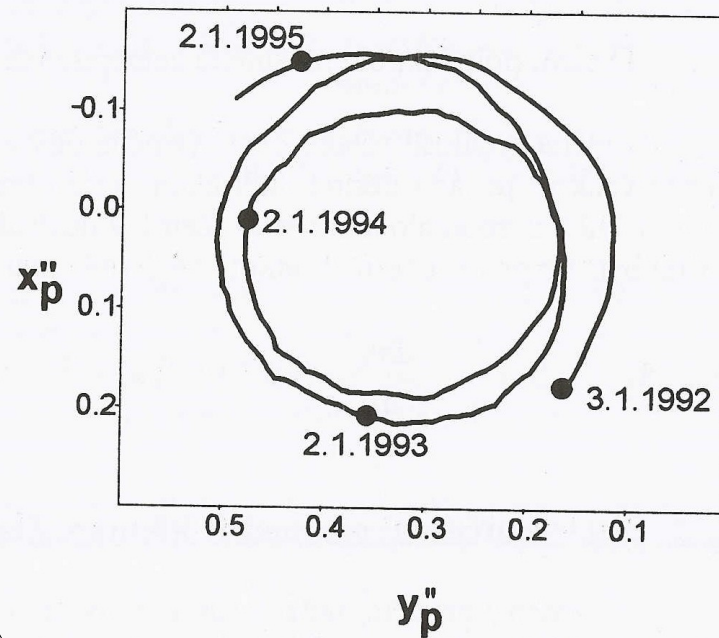
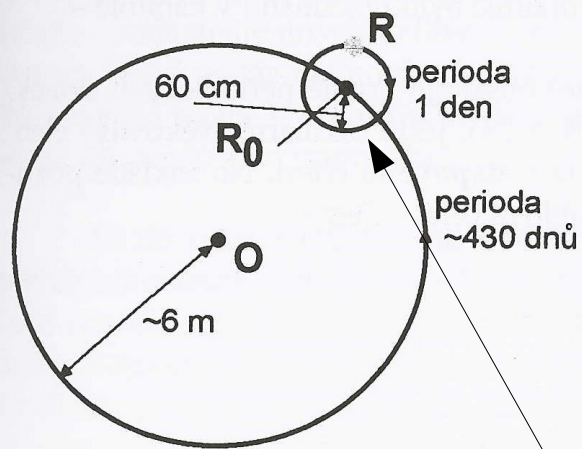
řešení Liouvillový rovnice

$$L_1 = (A - C) \sum_{j=1}^{\infty} B_j \cos(\omega_j t + \beta_j)$$

$$L_2 = (C - A) \sum_{j=1}^{\infty} B_j \sin(\omega_j t + \beta_j)$$

$$L = -(C - A) \sum_{j=1}^{\infty} B_j e^{-i(\omega_j t + \beta_j)}$$

pohyb pólu



$$m = m_0 e^{i\sigma_c t} + i \sum_j \frac{\sigma_E}{\omega_j + \sigma_c} \frac{1 + \frac{k}{k_s} \frac{\Delta\omega_j}{\Omega}}{1 + \frac{k}{k_s} \frac{\sigma_E}{\Omega}} B_j e^{-i(\omega_j t + \beta_j)}$$

Další vlivy (geofyzikální):

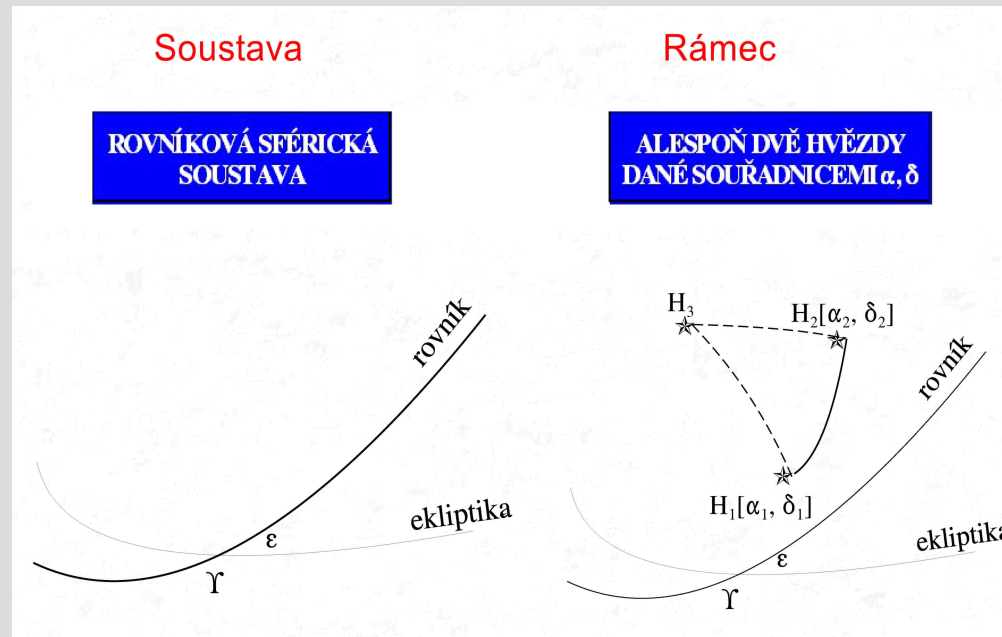
- Vliv oceánů:
 - Prodloužení periody Chandlerova pohybu o cca 35 dní;
 - Excitace Chandlerova pohybu;
 - Vynucené pohyby pólu (sezónní, jednodenní);
 - Excitace FCN ...
- Vliv atmosféry:
 - Vynucené pohyby pólu (změny tlaku);
 - Vynucené změny rychlosti rotace (zonální větry)
 - Excitace FCN ...
- Viskozita pláště:
 - Postupné tlumení Chandlerova pohybu;
 - Fázový posuv nutačních členů ...

.

referenční soustava

referenční rámec

- referenční soustava (reference system) – idea, definice
- referenční rámec (reference frame) – realizace referenční soustavy prostřednictvím reálných objektů



souřadnicové soustavy

- Nebeská referenční souřadnicová soustava
 - slouží k popisu poloh a pohybů nebeských tělesů musí být inerciální v newtonovském smyslu, tj. taková, aby v ní platily Newtonovy zákony a aby byla fixní vůči zbytku vesmíru, nerotující a její počátek bez zrychlení
 - realizace
 - kinematicky = prostřednictvím poloh a vlastních pohybů hvězd, příp. poloh extragalaktických objektů,
 - dynamicky = prostřednictvím přijatých teorií pohybu těles sluneční soustavy.

souřadnicové soustavy

- Terestrická referenční souřadnicová soustava
 - slouží k popisu poloh a pohybů na Zemi, astronomická pozorování většinou z povrchu Země.
 - realizace
 - prostřednictvím přijatých poloh vybraných observatoří, příp. jejich časových změn
- Pomocná (precesně-nutační) soustava
 - slouží k transformaci mezi nebeskou a terestrickou soustavou
 - je definována
 - přijatou osou (blízko okamžité osy rotace) donedávna CEP
 - přijatým počátkem na rovníku – donedávna jarní bod
 - od roku 2003 změna!!
 - CIP, CEO, TEO (viz video)
 - dosud se ale používají oba přístupy

transformace mezi CRS a TRS

- CRS = rovníková s.s.
- TRS počátek délek v Greenwich, rovník
- transformaci mezi nebeskou a pozemskou r.s. udávají parametry orientace Země
- pohyb pólu x_p, y_p (poloha CIP v terestrické soustavě)
- rotace UT1-UTC (úhel mezi počátky nebeské a terestrické s.)
- odchylky nebeského pólu $d\epsilon, d\psi$ (poloha CIP v nebeské s.)

$$\begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{pmatrix} = \mathbf{PN}(t) \mathbf{R}(t) \mathbf{W}(t) \begin{pmatrix} x_t \\ y_t \\ z_t \end{pmatrix}$$

Nové resoluce IAU (2000)

Přehled některých resolucí a příčin, vedoucích k jejich přijetí;

Podrobnější výklad k resolucím B1.6 - B1.8:

- Nová precese-nutace;
- Nová definice pólu a počátků;
- Nová transformace mezi pozemskou a nebeskou souř. soustavou.

Balík procedur ve Fortranu SOFA

<http://www.iau-sofa.rl.ac.uk/>

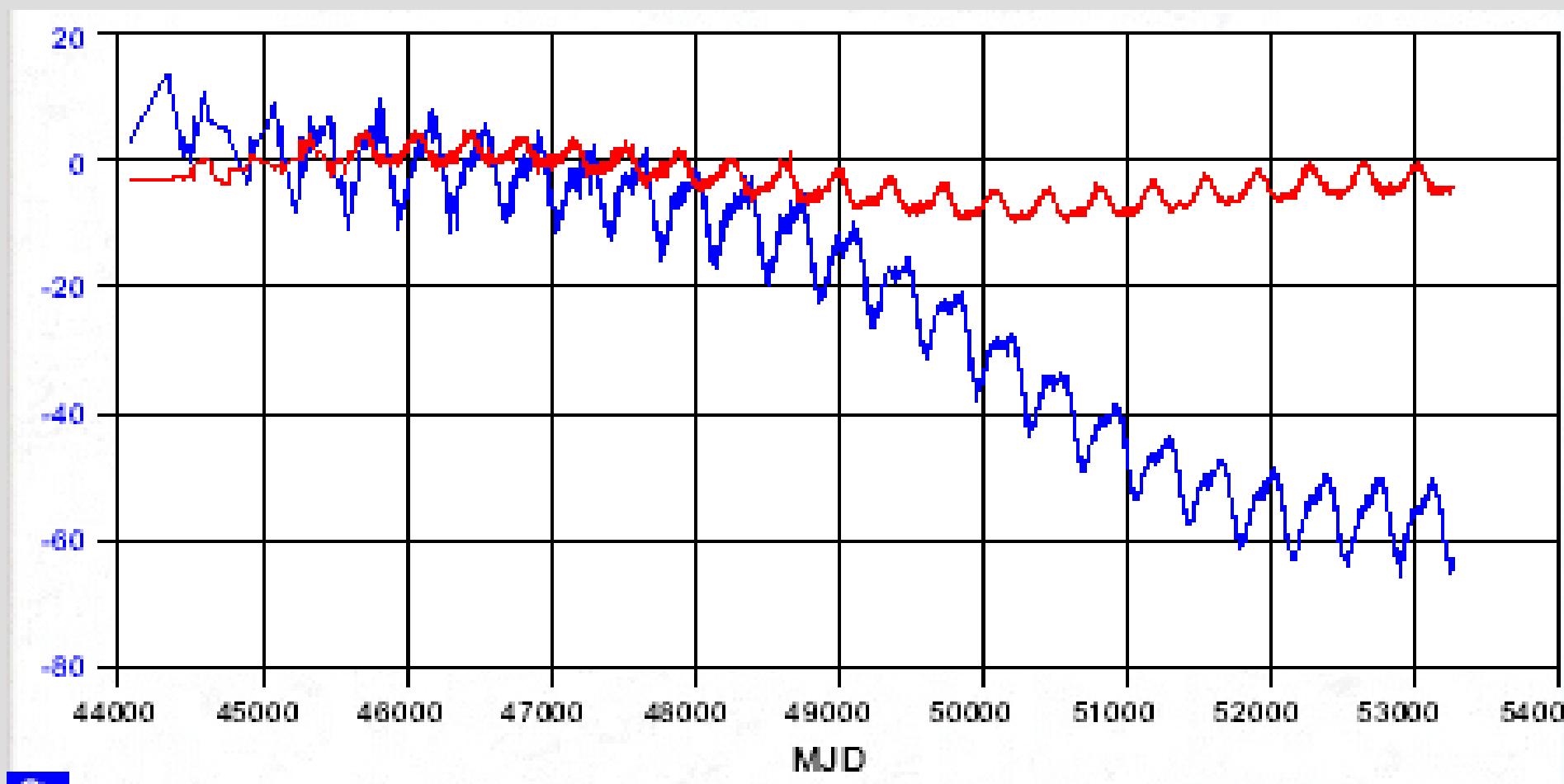
Předchozí resoluce

- **v r. 1991** - přijata koncepce nové definice nebeského referenčního systému a definice časových škál v rámci obecné teorie relativity;
- **v r. 1994** - přijat seznam extragalaktických zdrojů rádiového záření, definující konvenční referenční rámec a zřízena společná pracovní skupina IAU/IUGG pro přípravu nového modelu nutace netuhé Země;
- **v r. 1997** - přijat nový Mezinárodní nebeský referenční systém (International Celestial Reference System - ICRS) a rámec (International Celestial Reference Frame – ICRF):
 - jde o kinematically fixovanou soustavu;
 - ICRS - barycentrická pravoúhlá s., směry os fixované vzhledem k extragalaktickým objektům;
 - ICRF - realizace ICRS (přijaté hodnoty souřadnic);
 - Nová soustava je blízká rovníkové soustavě pro J2000.0 (tj. rámci katalogu FK5);
 - Nová soustava ani rámec nemají epochu!!

Nové resoluce

- B1.1 (ICRS + ICRF)
- B1.6 Nová precese a nutace
 - Původní Kinoshita/Wahr (vnější síly pouze od Měsíce a Slunce a přenosová funkce pro netuhou Zemi, počítané pro elastickou Zemi s tekutým jádrem bez atmosféry a oceánů),
 - Nová Souchay/MHB (též vnější síly od planet, MHB uvažuje též:
 - nepružnost Země,
 - elektromagnetické působení na rozhraních vnějšího tekutého jádra,
 - s pláštěm a vnitřním pevným jádrem,
 - roční atmosférické slapy,
 - geodetickou nutaci (projev obecné teorie relativity),
 - vliv oceánických slapů,
 - Některé parametry odhadnuty z VLBI

Odchyľky nebeského pólu od IAU1980



Komentář k resoluci B1.6

Nový model precese/nutace:

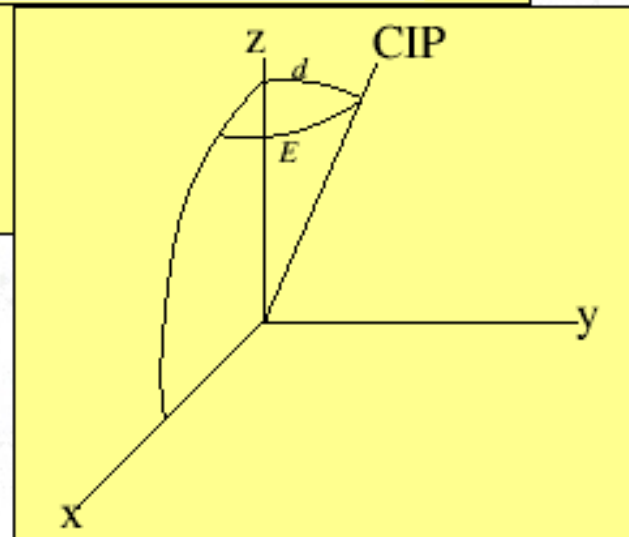
- Oprava dosavadní precese (IAU 1976):
 - $\Delta\psi = -0.04177'' - 0.002997''(t-2000)$,
 - $\Delta\epsilon = -0.00682'' - 0.000252''(t-2000)$;
- Nová nutace obsahuje cca 1400 periodických členů (stará jen 106);
- Nová formulace precesně-nutačních úhlů **X**, **Y** (souřadnice CIP v ICRS) a akumulované rotace **s** Celestial Ephemeris Origin po okamžitém rovníku:

$$X = \sin d \cos E = -0.016617'' + 2004.191742''t - 0.4272190t^2 + \dots + \text{period.}$$

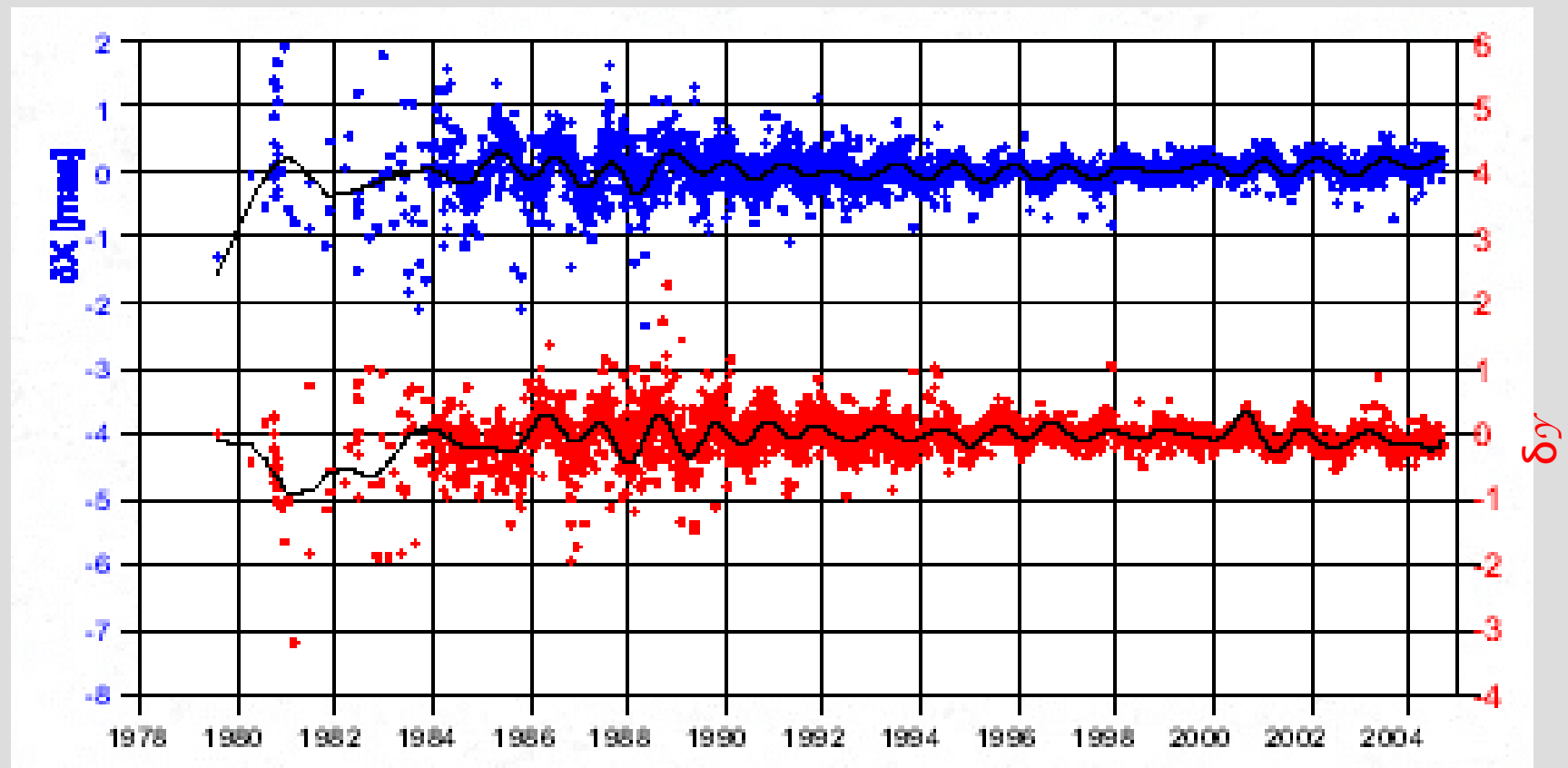
$$Y = \sin d \sin E = -0.006951'' + 0.025376''t - 22.4072510t^2 + \dots + \text{period.}$$

$$s = \int_{t_0}^t (\cos d - 1) \dot{E} dt = - \int_{t_0}^t \frac{X\dot{Y} - Y\dot{X}}{1 + \cos d} dt$$

$$s = 0'' \text{ (pro J2000.0), } 0.07'' \text{ (pro J2100.0)}$$



Odchylky nebeského pólu od IAU2000

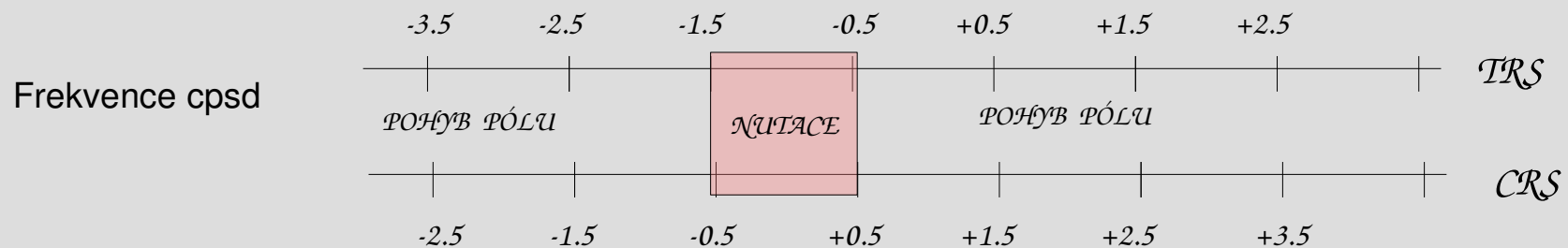


Nové resoluce

- B1.7 CIP (Celestial Intermediate pole)
 - I když k popisu vzájemné orientace mezi terestrickou a nebeskou soustavou postačují jen tři parametry (např. Eulerovy úhly) existuje zřejmá potřeba dvou dalších, popisujících pohyb konvencionální zvolené mezilehlé osy vůči oběma těmito soustavám.
 - Tato osa musí být zvolena tak, aby byla blízká okamžité ose rotace a aby její pohyb v terestrické a nebeské soustavě byl observačně oddělitelný. Tuto roli hrál doposud tzv. Celestial Ephemeris Pole (CEP), jehož definice byla založena na požadavku, aby nevykonával rychlý téměř jednodenní pohyb ani v jedné z obou referenčních soustav.

Nové resoluce

- B1.7 CIP (pokračování)
 - Tato definice se však nyní stala zastaralou a prakticky nerealizovatelnou, vzhledem k:
 - existenci malých vysokofrekvenčních (s periodami jeden den a kratších) pohybů okažité osy rotace vůči oběma soustavám, způsobených oceány a atmosférou;
 - současné přesnosti pozorování, která jsou schopná tyto pohyby detekovat.
 - Proto se zavádí nový Celestial Intermediate Pole (CIP) definovaný tak, že jeho periodický nebeský pohyb (nutace) obsahuje pouze členy o periodách delších než dva dny; všechny ostatní pohyby se interpretují jako terestrický pohyb pólu.



Komentář k resoluci B1.7

- Jde o zpřesněnou definici pólu (dosavadní název Celestial Ephemeris Pole);
- Jeho pohyb v geocentrické nebeské soustavě (GCRS) je dán vynuceným pohybem střední Tisserandovy osy Země o periodách větších než 2 dny;
- Tento pohyb je realizován modelem precese/nutace IAU2000A plus dalšími malými korekcemi určenými z pozorování IERS;
- Pohyb téhož pólu v pozemské souřadnicové soustavě (ITRS) se určuje z pozorování IERS a obsahuje též vysokofrekvenční složky (s výjimkou retrográdních jednodenních).

Nové resoluce

- **B1.8 CEO + TEO**

- Doposud se používal jarní bod a nulový poledník coby počátky, definující úhel vlastní rotace Země (greenwichský hvězdný čas). Okamžitý jarní bod, což je průsečík zemského rovníku a ekliptiky, závisí jednak na teorii orbitálního pohybu Země okolo Slunce, jednak na modelu precese a nutace.
- Odtud vyplývá, že jarní bod se pohybuje vůči nebeské soustavě podél rovníku (precese, rovnice ekvinokcií). Ekliptika, tedy rovina proložená dráhou Země (obecná trojrozměrná křivka)
 - se odvozuje na základě pozorování těles sluneční soustavy o mnohem nižší přesnosti nežli VLBI;
 - nemůže být definovaná jednoznačně, a navíc je zcela nepotřebná pro transformaci mezi terestrickou a nebeskou referenční soustavou.
- Oficiální konvenční nebeský systém ICRS, přijatý již v r. 1997, není založen na ekliptice a ekvinokciu.

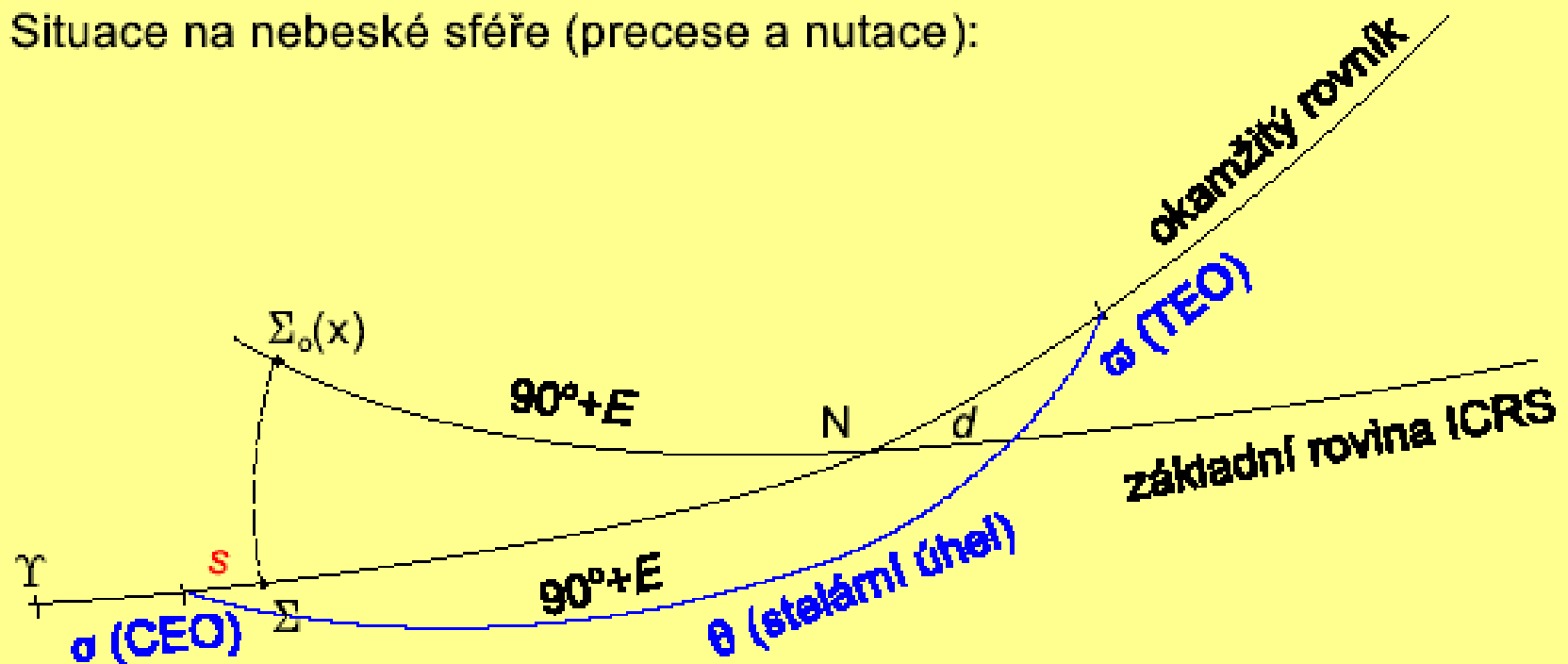
Nové resoluce

- **B1.8 CEO + TEO (pokračování)**

- Proto je rozumné vybrat takový počátek, který by byl nezávislý na orbitálním pohybu Země a přijatém modelu precese a nutace. Rovněž je výhodné definovat hvězdný úhel (Stellar Angle) s relativně jednoduchým vztahem ke světovému času (Universal time) UT1, jehož definice by se v budoucnu nemusela měnit při každé změně teorie orbitálního pohybu či rotace Země
- Toho je dosaženo přijetím Guinotovy koncepce 'nerotujícího počátku' na pohyblivém rovníku, odpovídajícím CIP - Celestial Ephemeris Origin (CEO). Ten je symetricky doprovázen podobnou koncepcí v terestrické soustavě - Terrestrial Ephemeris Origin (TEO). Úhel mezi CEO a TEO, Earth Rotation Angle (nebo Stellar Angle), je svázán se světovým časem UT1 jednoduchým lineárním vztahem.
- Transformace mezi terestrickým systémem ITRS a nebeským geocentrickým systémem GCRS je pak dána polohou CIP v GCRS, polohou CIP v ITRS a úhlem rotace Země (Earth Rotation Angle).

Komentář k resoluci B1.8

Situace na nebeské sféře (precese a nutace):



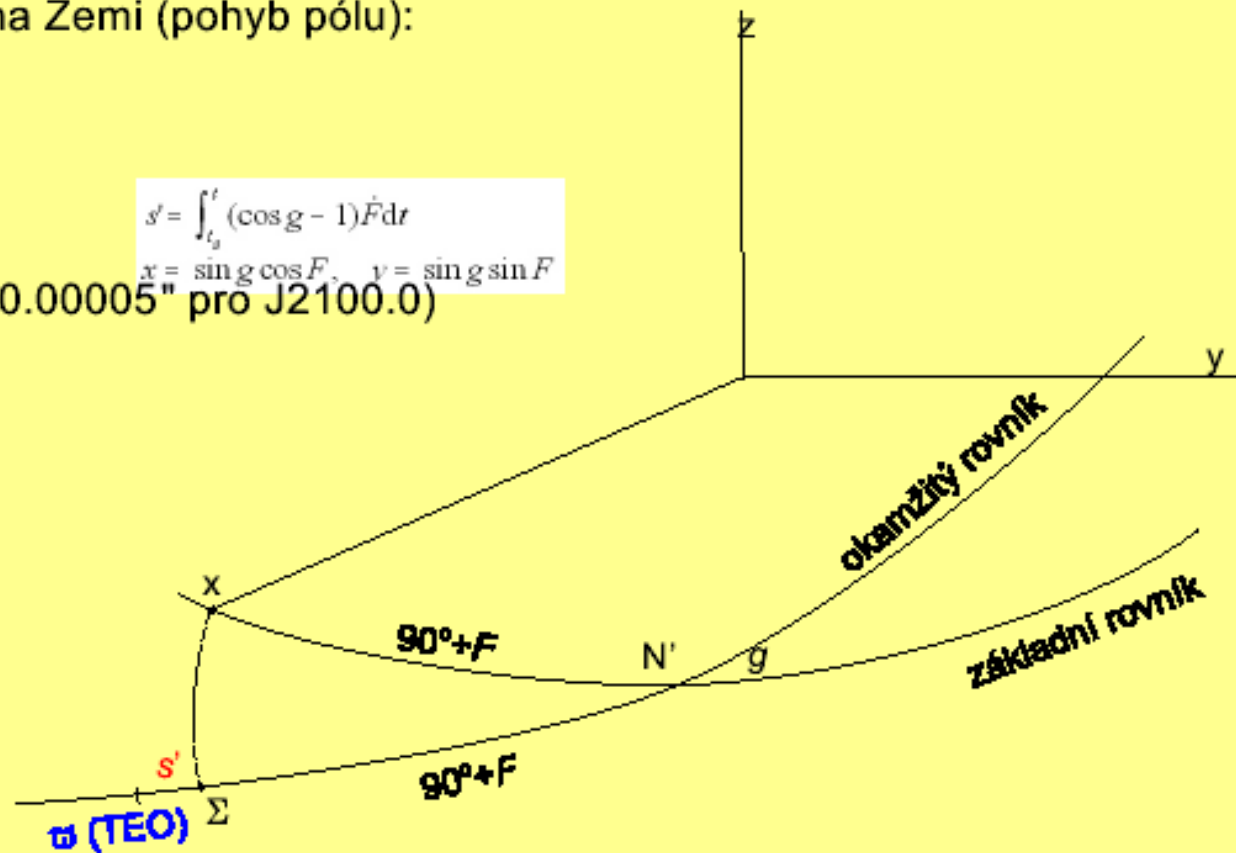
Komentář k resoluci B1.8

Situace na Zemi (pohyb pólu):

$$s' = \int_{t_0}^t (\cos g - 1) \dot{F} dt$$

$$x = \sin g \cos F, \quad y = \sin g \sin F$$

($s' < 0.00005''$ pro J2100.0)



Nové resoluce

- **B1.9 TT (terestrický čas)**
 - Terestrický čas (TT) byl definován IAU již v r. 1991 jako časová škála pro všechny praktické aplikace na Zemi, a nahradil terestrický dynamický čas (Terrestrial Dynamical Time TDT). TT je definován jako časová škála, která se liší od geocentrického souřadnicového času (Geocentric Coordinate Time TCG) pouze o konstantní chod, jeho jednotka byla vybrána tak, že souhlasí se sekundou SI na geoidu.
 - Tento konstantní chod proto závisí na přijaté hodnotě zemského potenciálu na geoidu, a měl by se tedy měnit pokaždé když IUGG přijme novou hodnotu této konstanty.
 - Aby se tomu předešlo, nová definice fixuje hodnotu chodu mezi TT a TCG, založenou na současně přijaté hodnotě potenciálu na geoidu, jakožto definující konstantu.
- **B2.0 UTC (světový koordinovaný čas)**
 - Nepředpověditelnost přestupných sekund ovlivňuje moderní komunikační a navigační systémy, a proto byla zřízena pracovní skupina IAU, která znovu zváží nutnost zavádění přestupných sekund a navrhne možnou změnu definice UTC.

Transformace mezi CRS a TRS:

Vztah mezi světovým časem UT1 a stelárním úhlem θ :

$$\theta(T_u) = 2\pi (0.7790572732640 + 1.00273781191135448T_u), \quad \text{kde} \\ T_u = JD(UT1) - 2451545.0$$

Transformační vztahy:

$$[CRS] = Q(t) \cdot R_3(-\theta) \cdot W(t) \cdot [TRS]$$

$$Q(t) = \begin{pmatrix} 1 - aX^2 & -aXY & X \\ -aXY & 1 - aY^2 & Y \\ -X & -Y & 1 - a(X^2 + Y^2) \end{pmatrix} \cdot R_3(s), \quad \text{kde} \quad a = \frac{1}{2} + \frac{1}{8}(X^2 + Y^2)$$

$$W(t) = R_3(-s') \cdot R_2(x) \cdot R_1(y)$$

shrnutí

- Ekvinokcium
 - Nulový poledník
 - Greenwichský hvězdný čas
 - Nebeský efemeridový pól (CEP)
 - Precese IAU1976 + nutace IAU1980
- nebeský efemeridový počátek (CEO);
 - terestrický efemeridový počátek (TEO);
 - stelární úhel;
 - nebeský mezilehlý pól (CIP);
 - precese+nutace IAU2000.