

GEODETSKA ASTRONOMIJA

2. OSNOVE SFERNE ASTRONOMIJE

2.3 PROMJENE KOORDINATA NEBESKIH TIJELA

predavanja, VI. semestar

IZBOR KOORDINATNOG SUSTAVA U ASTRONOMIJI (I)

IZBOR REFERENTNOG KOORDINATNOG SUSTAVA

- **DEFINIRAMO POLOŽAJE (ODREĐUJEMO KOORDINATE) NEBESKIH TIJELA I OPISUJEMO NJIHOVA GIBANJA**
- **IZBOR KOORDINATNOG SUSTAVA S VREMENSKI NEPROMIJENJENIM MEĐUSOBNIM POLOŽAJEM KOORDINATNIH OSI (TAKAV JE SUSTAV OBIČNO DEFINIRAN POLOŽAJEM KOORDINATNIH OSI U ODREĐENOM VREMENSKOM TRENUTKU – EPOHI)**

SFERNI (GEOMETRIJSKI) ASTRONOMSKI KOORDINATNI SUSTAVI (HORIZONTSKI, EKVATORSKI /mjesni i nebeski/, EKLIPTIČKI I GALAKTIČKI)

- **INERCIJALNI SUSTAVI (u okvirima klasične fizike) – KOORDINATNE OSI NE ROTIRAJU A ISHODIŠTE KOORDINATNOG SUSTAVA NIJE AKCELERIRANO**

PROMJENE KOORDINATA NEBESKIH TIJELA

- PROMJENE KOORDINATA ZBOG ZEMLJINE ROTACIJE (SAMO KOORDINATE HORIZONTSKOG I MJESNOG EKVATORSKOG KOORDINATNOG SUSTAVA)

-
- PRIVIDNA PROMJENA POLOŽAJA (SMJERA) NEBESKIH TIJELA:

ABERACIJA, PARALAKSA, REFRAKCIJA

- GIBANJE KOORDINATNIH SUSTAVA (PROMJENA PROSTORNE ORIJENTACIJE KOORDINATNIH OSI): PRECESIJA I NUTACIJA

- RELATIVNO MEĐUSOBNO GIBANJE ZVIJEZDA: VLASTITA GIBANJA ZVIJEZDA

- GIBANJE ZEMLJINOG POLA

PROMJENE KOORDINATA NEBESKIH TIJELA

(s obzirom na ishodište koordinatnog sustava /središte nebeske sfere/, zbog prividne promjene položaja nebeskih tijela)

TOPOCENTRIČNE I GEOCENTRIČNE KOORDINATE

TOPOCENTRIČNE KOORDINATE

- koordinate u mjesnom (topocentričnom) koordinatnom sustavu određene neposrednim motrenjem nebeskih tijela
- ishodište topocentričnog sustava (motritelj) rotira u odnosu na geocentrični sustav što je razlog pojavi DNEVNE ABERACIJE i DNEVNE (GEOCENTRIČNE) PARALAKSE
- REFRAKCIJA

TOPOCENTRIČNE I GEOCENTRIČNE KOORDINATE

GEOCENTRIČNE KOORDINATE

- koordinate u geocentričnom koordinatnom sustavu, odnosno položaj nebeskog tijela kojeg bi vidio opažatelj sa stajalištem u Zemljinom središtu i bez atmosfere (u astronomskim godišnjacima obično se koordinate α i δ navode u geocentričnom sustavu)
- ishodište geocentričkog sustava giba se (zbog Zemljine revolucije) u heliocentričnom koordinatnom sustavu što je razlogom pojavi ZVJEZDANE (GODIŠNJE) PARALAKSE, GODIŠNJE i PLANETSKE ABERACIJE

GEOCENTRIČNE I HELIOCENTRIČNE KOORDINATE

HELIOCENTRIČNE KOORDINATE

- koordinate u heliocentričnom koordinatnom sustavu, odnosno položaj nebeskog tijela kojeg bi vidio opažatelj sa stajalištem u Sunčevom središtu
 - računanje ZVJEZDANE (GODIŠNJE) PARALAKSE i GODIŠNJE ABERACIJE potrebno je poznavati za zadani vremenski trenutak Zemljin položaj u heliocentričnom sustavu i njenu trenutačnu brzinu (strogo: položaj središta masa sustava Zemlja-Mjesec, koje je relativno blizu Zemljinom središtu pa je paralaktička korekcija u odnosu na geocentričnu paralaksu gotovo zanemariva a aberacijski su efekti reda veličine 10^{-3} lučnih sekundi)
 - RELATIVISTIČKI EFEKT (razlika relativističkih i približnih klasičnih izraza za godišnju aberaciju veća od današnje preciznosti mjerenja, za dnevnu aberaciju relativistički su izrazi praktično nepotrebni)
 - PLANETNA ABERACIJA (u razmatranju dinamike planetnog sustava)
-
- heliocentrični sustav nije najpovoljniji sustav (njegovo ishodište /središte Sunca/ giba se u odnosu na centar masa Sunčevog sustava)
 - stoga se upotrebljava baricentrički sustav s ishodištem u središtu masa Sunčeva sustava

HELIOCENTRIČNE I BARICENTRIČNE KOORDINATE

BARICENTRIČNE KOORDINATE

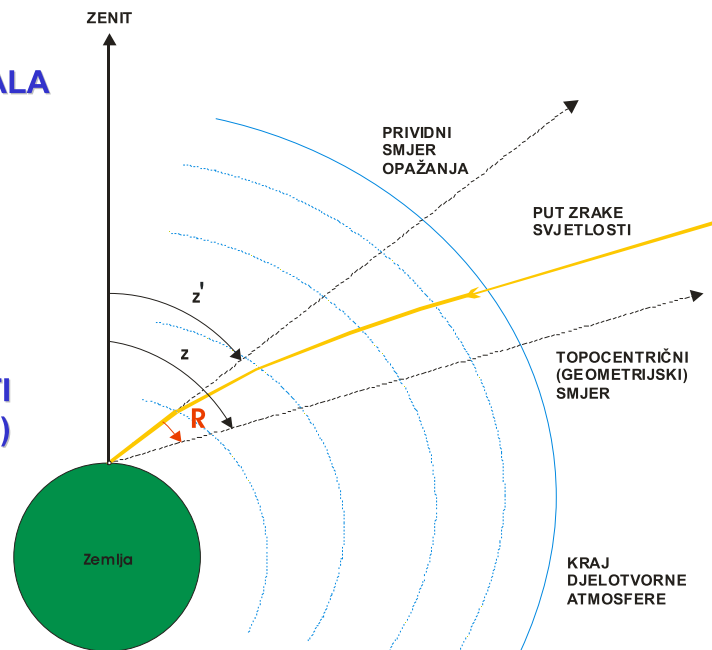
- koordinate u baricentričnom koordinatnom sustavu s ishodištem u središtu masa Sunčeva sustava, odnosno položaj nebeskog tijela kojeg bi vidio opažatelj sa stajalištem u baricentru Sunčeva sustava
- kada bi se svi planeti poredali u istom smjeru tada bi središte Sunca bilo udaljeno od središta masa manje od 10^{-2} a. j. ($< 1496 \times 10^3$ km a promjer Sunca je 1392×10^3 km)
- korekcije PARALAKSE i ABERACIJE pri prijelazu s heliocentričnog na baricentrični sustav su male vrijednosti i značajne su samo kod vrlo preciznih mjerenja

REFRAKCIJA

- PROMJENA SMJERA SVJETLOSTI PRI PROLAZU KROZ ZEMLJINU ATMOSFERU UZROKOVANA LOMOM SVJETLOSTI NA GRANICI ATMOSFERSKIH SLOJEVA RAZLIČITE GUSTOĆE

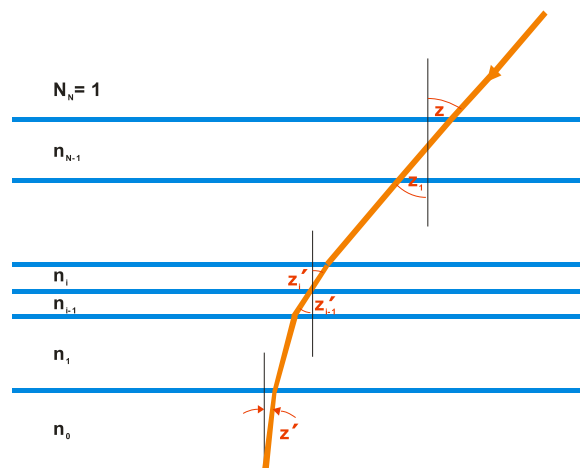
- POSLJEDICA JE PRIVIDNA PROMJENA POLOŽAJA NEBESKIH TIJELA TAKO DA JE PRIVIDNA VISINA TIJELA VEĆA OD GEOMETRIJSKE (ODNOSNO OPAŽANA ZENITNA DALJINA MANJA JE OD STVARNE /TOPOCENTRIČNE/ ZENITNE DALJINE U KOJOJ BI VIDJELI TIJELO KADA NE BI POSTOJALA REFRAKCIJA)

- IZNOS REFRAKCIJE OVISI O VISINI NEBESKOG TIJELA (ZENITNOJ DALJINI) I ATMOSFERSKIM UVIJETIMA ODNOSNO LOMU SVJETLOSTI (INDEKSU LOMA SVJETLOSTI) POGlavITO U GUSTOM PRIZEMNOM SLOJU – TROPOSFERI (DO VISINE OD DESETAK KILOMETARA)



- ZA JEDNOSTAVNI MODEL ZEMLJINE ATMOSFERE (TANKI I HOMOGENI ATMOSFERSKI SLOJ KONSTANTNOG INDEKSA LOMA n_0) KUT REFRAKCIJE OVISI SAMO O ZENITNOJ DALJINI (ILI VISINI) NEBESKOG TIJELA

$$R = z - z'$$



prema zakonu loma svjetlosti je $\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{n_2}{n_1}$ uz pretpostavku da je izvan

homogene Zemljine atmosfere vakuum (indeks loma 1) slijedi $\frac{\sin z}{\sin z'} = n_0$

uvrštenjem $z = R + z'$ te sređivanjem izraza ($\cos R \approx 1$ i $\sin R \approx R$) slijedi

da refrakciju R (") računamo prema $R'' = 206265 (n_0 - 1) \operatorname{tg} z' = K \operatorname{tg} z'$

- određujemo li kut refrakcije uz pretpostavku da je atmosfera sastavljena od slojeva, od kojih svaki ima konstantan indeks loma, vidjet ćemo da i za ovaj nešto složeniji model atmosfere vrijedi jednak izraz za refrakciju kao da je atmosfera građena samo od jednog sloja konstantnog indeksa loma

$$R'' = 206265 (n_0 - 1) \operatorname{tg} z' = K \operatorname{tg} z'$$

gdje je n_0 indeks loma svjetlosti, koji je ovisan o atmosferskim uvjetima (temperaturi i tlaku zraka), sastavu atmosfere i valnoj duljini svjetlosti, pri normalnim atmosferskim uvjetima $n_0 = 1,0002927$ a konstanta atmosferske refrakcije $K = 60,4''$

- prema tome i u modelu "slojevite" atmosfere refrakcija ovisi samo o indeksu prizemnog sloja – troposferi
- naime, polumjer zakrivljenosti troposfere znatno je veći od njene visine, pa takav model atmosfere možemo zamisliti kao ravni zračni sloj
- model ravne atmosfere daje dobre rezultate pri određivanju refrakcije za male zenitne daljine ($< 20^\circ$), na većim zenitnim daljinama potrebno je uzeti u obzir zakrivljenost Zemljine atmosfere

- ZA POTREBE TOČNIH MJERENJA REDOVITO SE UPOTREBLJAVA SLOŽENIJI TEORIJSKI IZRAZI U KOMBINACIJI S EKSPERIMENTALNIM MJERENJIMA

$$R = A \operatorname{tg} z' + B \operatorname{tg}^3 z' + C \operatorname{tg}^5 z' + \dots$$

GDJE SE KONSTANTE A, B, C ... ODREĐUJU IZ SUSTAVA JEDNADŽBI, OBIČNO OPAŽANJEM CIRKUMPOLARNIH ZVIJEZDA POZNATIH DEKLINACIJA

SREDNJA ILI NORMALNA REFRAKCIJA

- za temperaturu 0°C i tlak $1013,247$ mbara, zenitne daljine od 0° do 75°

$$R = 60,29'' \operatorname{tg} z' - 0,06688'' \operatorname{tg}^3 z' + 0,0002'' \operatorname{tg}^5 z' - 0,000001'' \operatorname{tg}^7 z' \dots$$

- uzmemo li u obzir atmosferske uvijete: stajališnu temperaturu i tlak zraka

$$R = \left(60,29'' \operatorname{tg} z' - 0,067'' \operatorname{tg}^3 z' + \dots \right) \frac{273^\circ}{1013,247} \frac{p}{273^\circ + t}$$

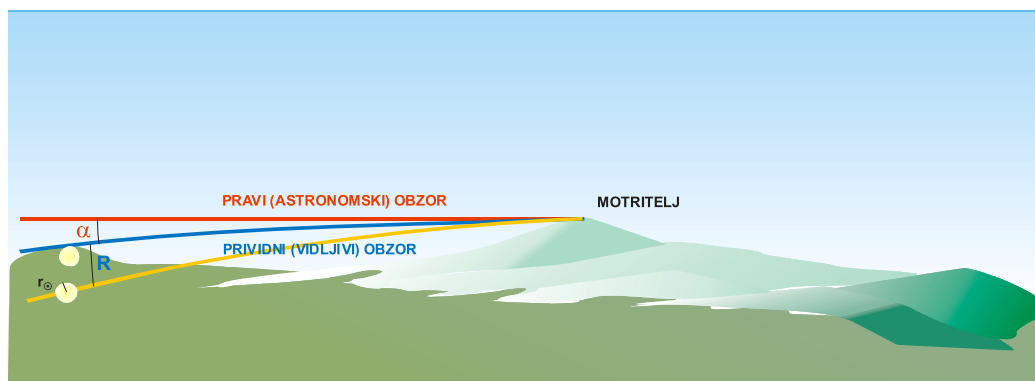
- ZA ZENITNE DALJINE VEĆE OD 75° PRIMJENJUJEMO PRIBLIŽNE, APROKSIMATIVNE FORMULE
- AKO SE NEBESKO TIJELO NALAZI VRLO BLIZU OBZORA REFRAKCIJA POPRIMA ZNATNO VEĆU VRIJEDNOST, KOJA JE PRILIČNO NEODREĐENA I PROMJENJLJIVA, STOGA SE PRECIZNA ASTROMETRIJSKA MJERENJA NE OBAVLJAJU OPAŽANJEM NEBESKIH TIJELA NA VELIKIM ZENITNIM DALJINAMA
- AKO JE NEBESKO TIJELO TOČNO NA GEOMETRIJSKOM HORIZONTU ($z = 90^\circ$) PRIPADNI KUT REFRAKCIJE NAZIVAMO **HORIZONTSKA REFRAKCIJA** (iznosi **oko $35'$** , i veća je od prividnog promjera Sunca ili Mjeseca)
- PREMA TOME KADA SUNCE (ili MJESEC) VIDIMO TOČNO NA SLOBODNOM HORIZONTU NJEGOVA JE TOPOCENTRIČNA ZENITNA DALJINA OKO $90^\circ 35'$ I GEOMETRIJSKI SE NALAZI ISPOD HORIZONTA
- PRIVIDNA DEFORMACIJA (SPLJOŠTENOST) SUNČEVA DISKA (ZBOG REFRAKCIJE DONJI SE KRAJ DISKA “PODIŽE” ZA $35'$ A GORNJI ZA $28'$)

▪ ODREĐIVANJA IZLAZA I ZALAZA SUNCA

PRAVI (ASTRONOMSKI) I PRIVIDNI (VIDLJIVI) OBZOR

DUBINA VIDLJIVA HORIZONTA – kut između pravog i prividnog obzora (horizontska depresija ovisi o visini motriteljevog stajališta, zakrivljenosti Zemljine površine i refrakciji)

$$z = 90^\circ + \alpha + R + r_o - \pi_h$$



- PRI RAČUNANJU IZLAZA I ZALAZA NEBESKOG TIJELA POTREBNO JE UZETI U OBZIR UTJECAJ REFRAKCIJE, DUBINE VIDLJIVA OBZORA I SUNČEVOG POLUMJERA (ZA $\phi \approx 45^\circ$ KOREKCIJA VREMENA IZLAZA ILI ZALAZA SUNCA IZNOSI OKO 5 MINUTA)

PARALAKSA

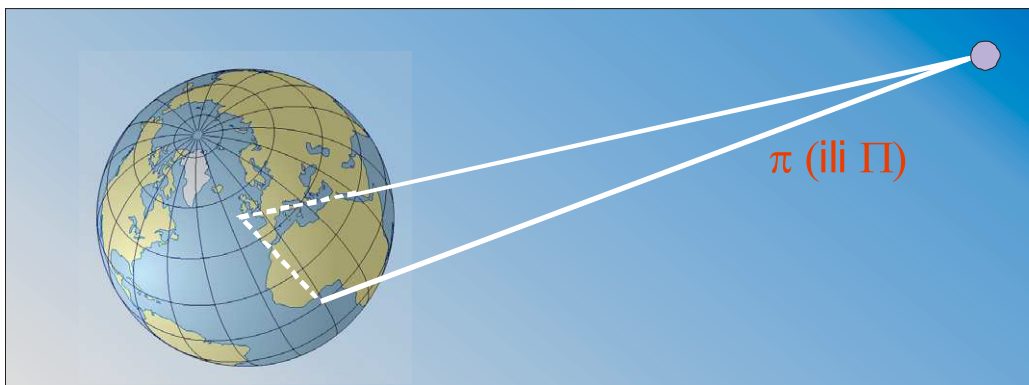
- RAZLIKA U PRIVIDNOM SMJERU (POLOŽAJU) NEBESKOG TIJELA, KOJEG VIDIMO S DVA RAZLIČITA MJESTA (STAJALIŠTA); ISTO KUT S VRHOM U NEBESKOM TIJELU IZMEĐU PRAVACA KOJI POVEZUJU DVA RAZLIČITA POLOŽAJA MOTRITELJA

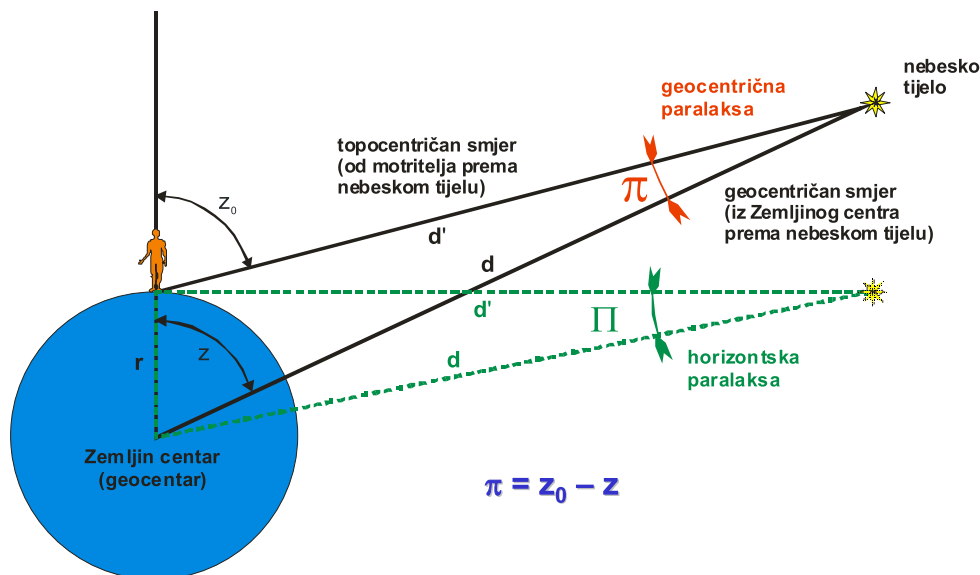
DNEVNA ILI GEOCENTRIČNA PARALAKSA

GODIŠNJA ILI ZVJEZDANA PARALAKSA

DNEVNA ILI GEOCENTRIČNA PARALAKSA

- RAZLIKA IZMEĐU TOPOCENTRIČNOG I GEOCENTRIČNOG SMJERA NA NEBESKO TIJELO. ODNOSNO, KUT POD KOJIM SE VIDI, IZ CENTRA NEBESKOG TIJELA, ZEMLJIN POLUMJER





- primjenom sinusovog poučka dobijemo

$$\frac{\sin \pi}{\sin z_0} = \frac{r}{d}$$

$$\sin \pi = \frac{r}{d} \sin z_0 = \frac{r}{d'} \sin z$$

- ako se motritelj nalazi na ekvatoru a promatrani objekt na astronomskom obzoru ($z_0 = 90^\circ$) pripadna paralaksa Π naziva se

EKVATORSKA HORIZONTSKA PARALAKSA

$$\sin \Pi = \frac{r}{d}$$

- znajući horizontsku paralaksu nekog nebeskog tijela možemo izračunati geocentričnu udaljenost tog tijela
- na taj su način prvi put točno određene udaljenosti unutar Sunčevog sustava
- horizontska paralaksa nije konstantna veličina (eliptične planetne staze), stoga se definiraju srednje vrijednosti horizontskih paralaksi npr. srednja Mjesečeva horizontska paralaksa iznosi oko $57'$
- horizontska paralaksa tijela koje se nalazi na udaljenosti 1 a. j. naziva se solarna paralaksa i praktično je jednaka srednjoj horizontskoj paralaksi Sunca

$$\Pi_0 = \arcsin \left(\frac{r_{\oplus}}{a.j.} \right) = \frac{r_{\oplus}}{a.j.} \rho'' = \frac{6,378140 \cdot 10^3}{1,4959787 \cdot 10^8} 206264,8'' = 8,794148'' \quad (8,794144'')$$

Π_0 – solarna paralaksa

r_{\oplus} – Zemljin ekvatorski polumjer

d – udaljenost nebeskog tijela

1 a. j. = $1,49597870 \times 10^8$ km – astronomska jedinica

$\rho'' = 206264,8''$

- **horizontske paralakse tijela u sunčevom sustavu (Sunca, planeta i kometa) često iskazujemo vrijednostima njihovih udaljenosti izraženim u a. j.**

$$\sin \Pi = \frac{\sin \Pi_0}{d} \Rightarrow \Pi = \frac{\Pi_0}{d(a.j.)}$$

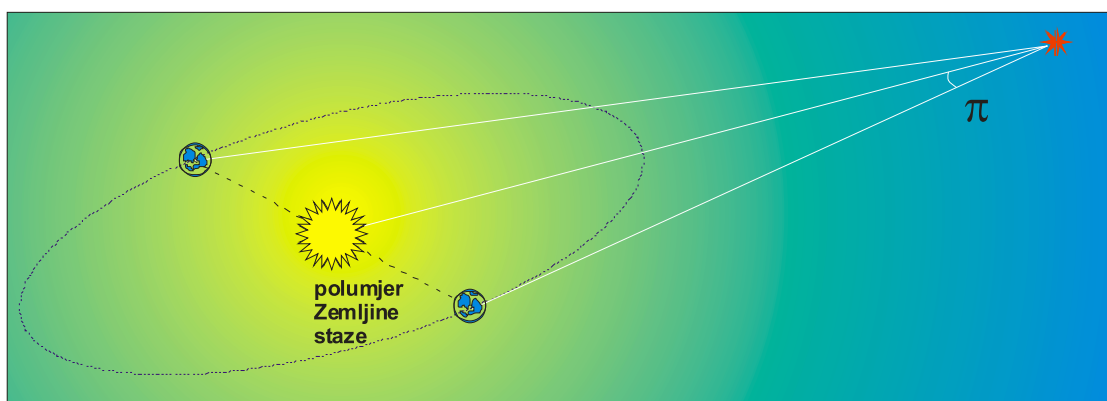
- **npr. horizontska paralaksa Venere poprima vrijednosti od 5" do 34", paralaksa Saturna je 1" a Plutona 0,22"**

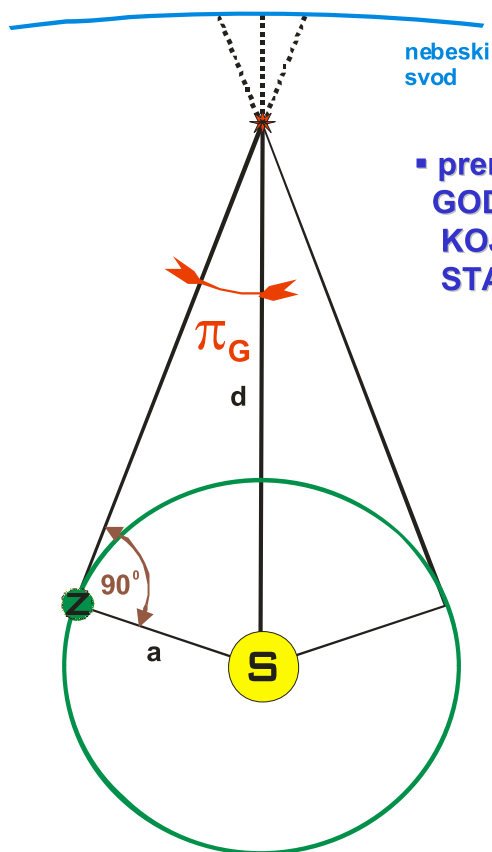
$$\Pi_{PL} = \frac{\Pi_0}{d(a.j.)} = \frac{8,794''}{39,6} = 0,22''$$

GEOCENTRIČNA PARALAKSA ZNAČAJNA JE ZA BLIŽA NEBESKA TIJELA, POGLAVITO TIJELA SUNČEVOG SUSTAVA A ZA ZVIJEZDE JE ZANEMARIVA

GODIŠNJA ILI ZVJEZDANA PARALAKSA

- **RAZLIKA IZMEĐU GEOCENTRIČNOG I HELIOCENTRIČNOG SMJERA NA NEBESKO TIJELO, ODNOSNO, KUT POD KOJIM SE S NEKE ZVIJEZDE VIDI POLUMJER ZEMLJINE STAZE**





- prema definiciji:
GODIŠNJA PARALAKSA ZVIJEZDE JE KUT POD KOJIM SE SA ZVIJEZDE VIDI POLUMJER ZEMLJINE STAZE OKOMIT NA UDALJENOST ZEMLJA-ZVIJEZDA

$$\frac{\sin \pi_G}{\sin \beta} = \frac{a}{d} \quad \beta = 90^\circ \Rightarrow \sin \pi_G = \frac{a}{d}$$

kako je heliocentrična udaljenost zvijezde d mnogo veća od polumjera Zemljine staze $a = 1 \text{ a. j.}$, slijedi da je godišnja paralaksa zvijezde π_G vrlo mala i možemo pisati

$$\sin \pi_G = \pi_G'' = \frac{a}{d} \rho''$$

- paralaksa u općenitom slučaju, kada smjer nebeskog tijela i polumjer Zemljine staze tvore proizvoljan kut

- primjenom sinusovog poučka

$$\frac{\sin \pi}{\sin \beta_1} = \frac{a}{d}$$

i uz pretpostavku da je π mali kut dobijemo

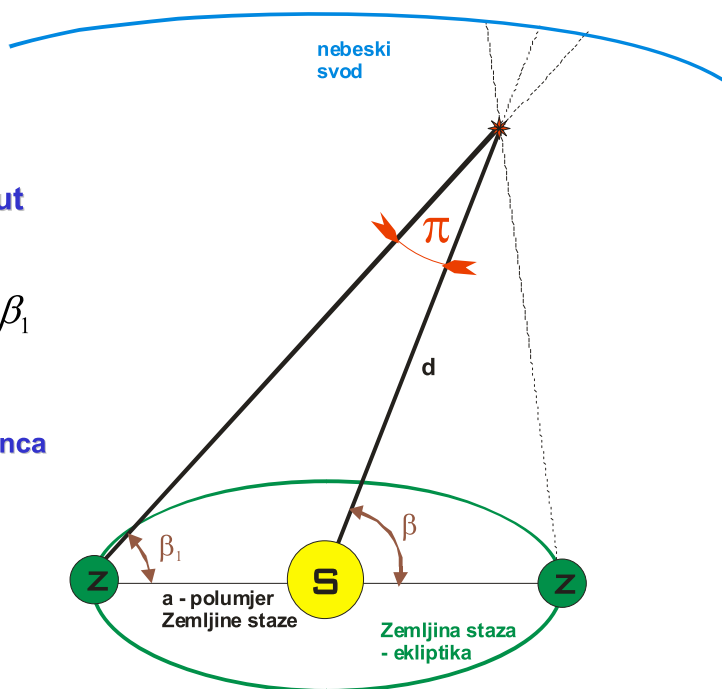
$$\sin \pi = \pi = \frac{a \sin \beta_1}{d} = \pi_G \sin \beta_1$$

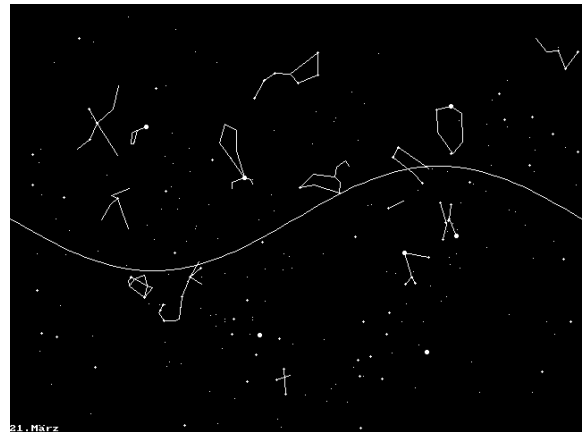
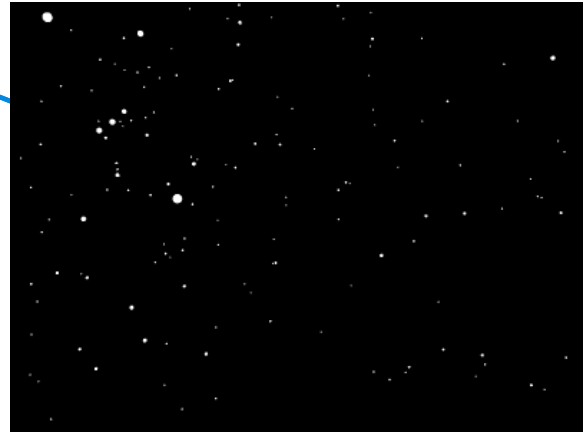
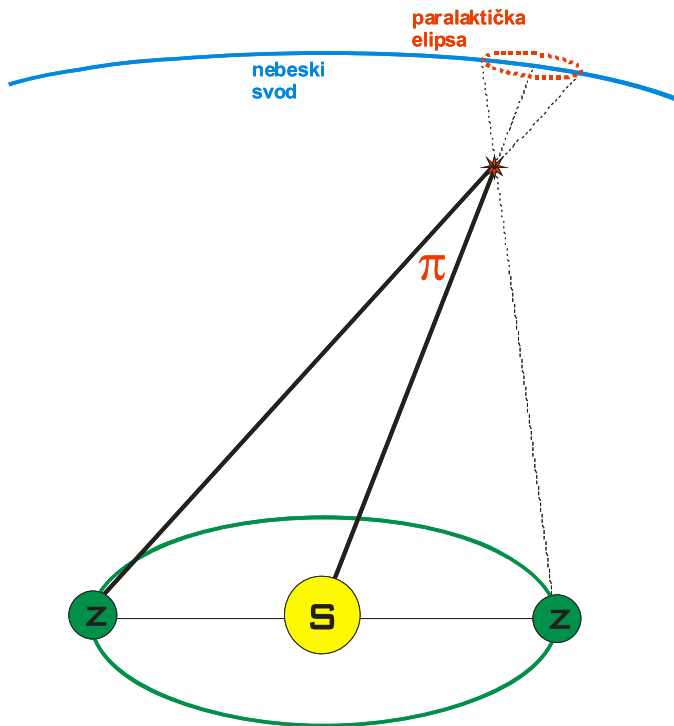
gdje je

π_G – godišnja paralaksa zvijezde
 β_1 – kutna udaljenost zvijezde od Sunca

kako je paralaksa zvijezda male vrijednosti možemo uzeti da je $\beta_1 = \beta$ te slijedi

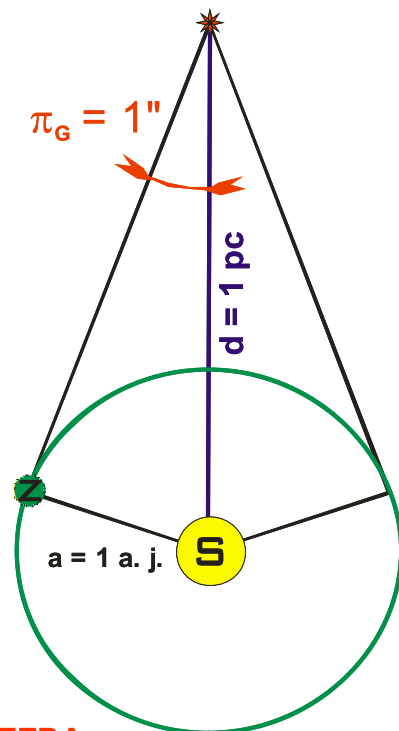
$$\pi = \pi_G \sin \beta$$





PARALAKTIČKA ELIPSA

prividni položaj zvijezde opisuje elipsu oko svog pravog ili heliocentričnog položaja



- SVE ZVIJEZDE IMAJU PARALAKSU MANJU OD JEDNE LUČNE SEKUNDE
- SAMO 23 ZVIJEZDE IMAJU PARALAKSU VEĆU OD 0,24"
- NAJVEĆU ZVJEZDANU PARALAKSU OD 0,75" IMA PROXIMA CENTAURI
- VRIJEDNOST PARALAKSE KOD VEĆINE ZVIJEZDA NE PRELAZI NEKOLIKO STOTINKI LUČNE SEKUNDE

ABERACIJA

- PRIVIDNA PROMJENA POLOŽAJA NEBESKOG TIJELA U ODNOSU NA GEOMETRIJSKI POLOŽAJ, POSLJEDICA JE RELATIVNOG TRANSVERZALNOG GIBANJA MOTRITELJA U ODNOSU NA OPAŽANO NEBESKO TIJELO I KONAČNOSTI BRZINE SVJETLOSTI

ZVJEZDANA ABERACIJA

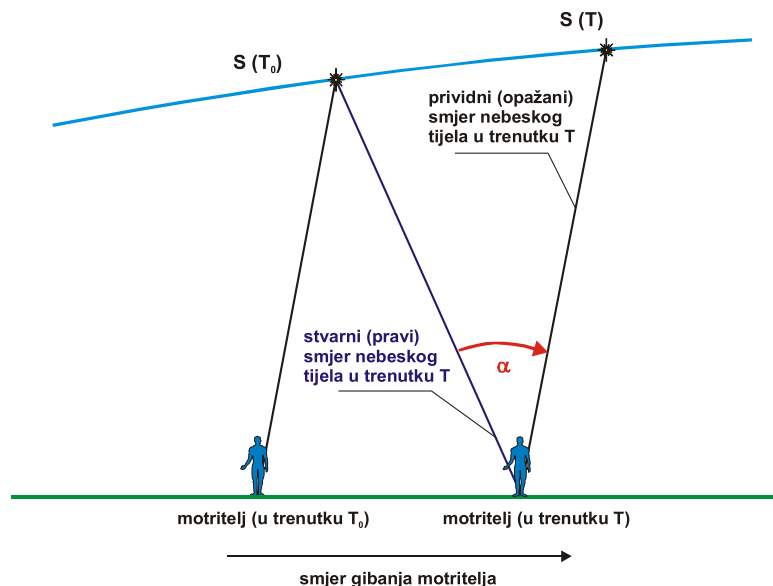
DNEVNA
GODIŠNJA
SEKULARNA

PLANETSKA ABERACIJA

ZVJEZDANA ABERACIJA

PRIVIDNA PROMJENA POLOŽAJA PROMATRANOG NEBESKOG TIJELA ZBOG GIBANJA MOTRITELJA, ODNOSNO ZBOG TOGA ŠTO BRZNA KRETANJA MOTRITELJA NIJE ZANEMARIVO MALA PREMA BRZINI SVJETLOSTI

DNEVNA
GODIŠNJA
SEKULARNA



DNEVNA ABERACIJA (komponenta zvjezdane aberacije)

NASTAJE ZBOG GIBANJA MOTRITELJA UZROKOVANOG ZEMLJINOM ROTACIJOM, ODNOSNO GIBANJA MOTRITELJA U ODNOSU NA ZEMLJINU OS VRTNJE, ZBOG ČEGA SE SMJER OPAŽANOG NEBESKOG TIJELA NE PODUDARA SA STVARNIM POLOŽAJEM

- kut između stvarnog i prividnog položaja nebeskog tijela računamo prema formuli

$$\alpha = \rho'' \frac{v}{c}$$

v – brzina motritelja
 c – brzina svjetlosti

(izraz vrijedi samo kada je brzina (smjer gibanja) motritelja okomita na smjer izvora)

- za motritelja na Zemljinoj površini kut dnevne aberacije je

$$\alpha = \rho'' \frac{r \omega \cos \varphi}{c}$$

φ – geocentrična širina stajališta
 ω – kutna brzina Zemljine vrtnje
 r – geocentrična udaljenost stajališta

- za motritelja na Ekvatoru ($r = 6,378140 \times 10^6$ m, $c = 2,99792458 \times 10^8$ m/s i $\omega = 7,292 \times 10^{-5}$) najveći je iznos dnevne aberacije koju nazivamo KONSTANTA DNEVNE ABERACIJE

$$\alpha_D = 0,32''$$

- za slučaj kada je brzina motritelja (smjer gibanja motritelja) okomit na smjer nebeskog tijela vrijedi

$$\alpha = 0,32'' \cos \varphi$$

GODIŠNJA ABERACIJA (komponenta zvjezdane aberacije)

NASTAJE ZBOG GIBANJA MOTRITELJA UZROKOVANOG ZEMLJINOM REVOLUCIJOM

- analogno izrazu za dnevnu aberaciju odnosno konstantu dnevne aberacije, kada je brzina (smjer gibanja) motritelja okomita na smjer nebeskog tijela, vrijednost KONSTANTE GODIŠNJE ABERACIJE dana je izrazom uz uvjet da se Zemlja giba oko Sunca jednoliko po kružnici polumjera jednakog srednjoj udaljenosti Zemlja-Sunce

$$\alpha_G = \rho'' \frac{2\pi a}{aT} = 20,49''$$

a – polumjer kružnice srednje udaljenosti Zemlja-Sunce
 T – vrijeme ophoda Zemlje oko Sunca

- točnija vrijednost za konstantu godišnje aberacije, koja uključuje eliptičnost Zemljine staze i dinamiku problema dva tijela definirana je izrazom

$$\alpha_G = \rho'' \frac{k}{c} \sqrt{\frac{1+m}{a(1-e^2)}}$$

k – Gaussova konstanta
 m – Zemljina masa
 a – velika poluos Zemljine staze

- za epohu J2000,0 konstanta godišnje aberacije iznosi

$$\alpha_G = 20,49552''$$

- kut godišnje aberacije u općenitom slučaju računamo prema izrazu (\mathcal{G} kut između smjera opažačevog gibanja i smjera nebeskog tijela)

$$\alpha = \alpha_G \sin \mathcal{G}$$

SEKULARNA ABERACIJA (komponenta zvjezdane aberacije)

- POSLJEDICA JE GIBANJA SUNČEVOG SUSTAVA U PROSTORU, ODNOSNO GIBANJA SUNČEVOG SUSTAVA OKO GALAKTIČKOG SREDIŠTA (SEKULARNU ABERACIJU OBIČNO ZANEMARUJEMO)

PLANETSKA ABERACIJA

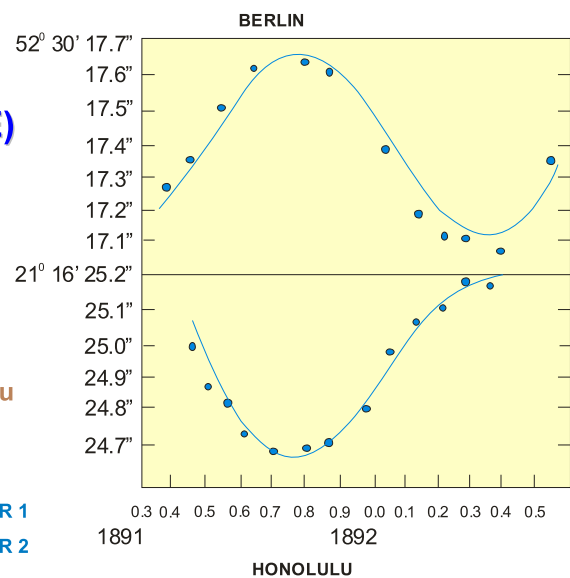
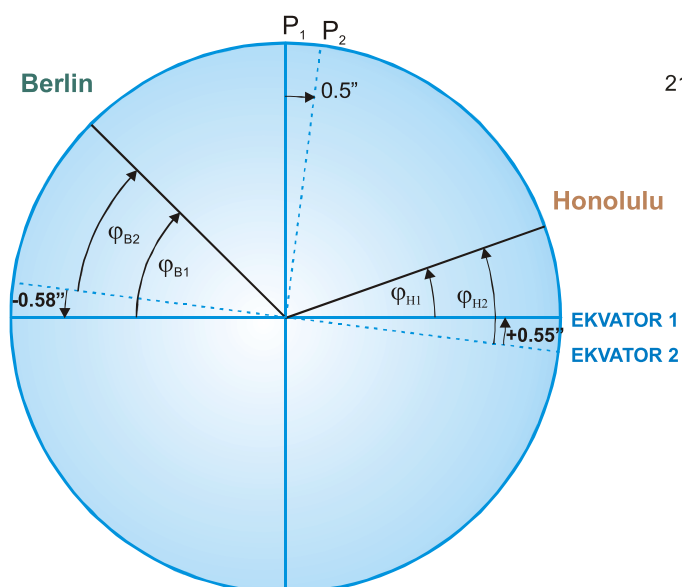
- POJAM KLASIČNE FIZIKE KOJI SE UPOTREBLJAVA ZA OPIS PRIVIDNE PROMJENE POLOŽAJA NEBESKOG TIJELA ZBOG GIBANJA MOTRITELJA U ODNOSU NA PROMATRANO NEBESKO TIJELO I NJEGOVOG VLASTITOG GIBANJA
- PROMJENE POLOŽAJA PLANETA I DRUGIH TIJELA SUNČEVA SUSTAVA ZBOG GODIŠNJE ABERACIJE I KAŠNJENJA SVJETLOSTI S PLANETA, DAKLE PLANETSKA ABERACIJA UZIMA U OBZIR GIBANJE OPAŽAČA (ZEMLJINA REVOLUCIJA) I VLASTITO GIBANJE OPAŽANOG NEBESKOG TIJELA

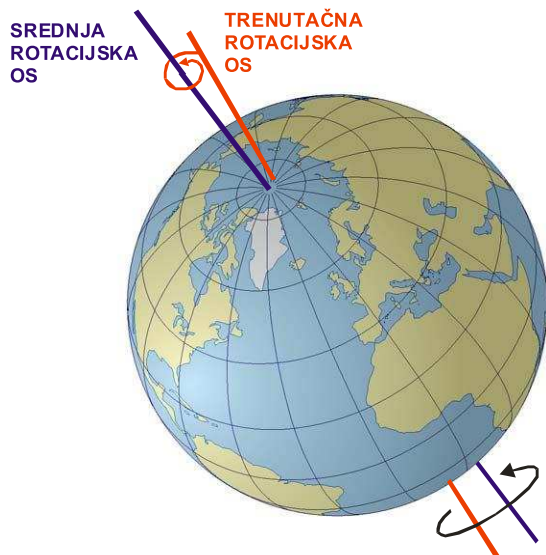
GIBANJE ZEMLJINOG POLA

- GIBANJE PRAVOG POLA OKO OSI MOMENTA INERCIJE (NEPOKLAPANJE ZEMLJINE ROTACIJSKE OSI S OSI SIMETRIJE ZEMLJINIH MASA), U SMISLU KRETANJA KAZALJKE NA SATU GLEDANO SA SJEVERNOM POLA, U INTERVALU OKO 1,2 GODINE

1891. IAG (International Associations of Geodesy)

- dva istodobna određivanja širine
BERLIN, Njemačka
HONOLULU, Havaji (oko 180° E)





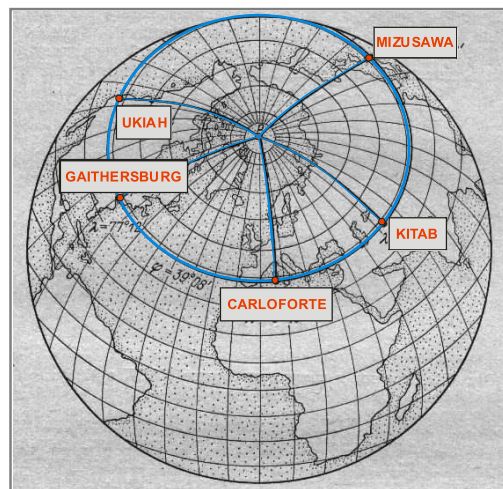
IAG organizira mrežu motriteljskih stanica

1899. g.,

Na prijedlog F. Helmerta osnovana

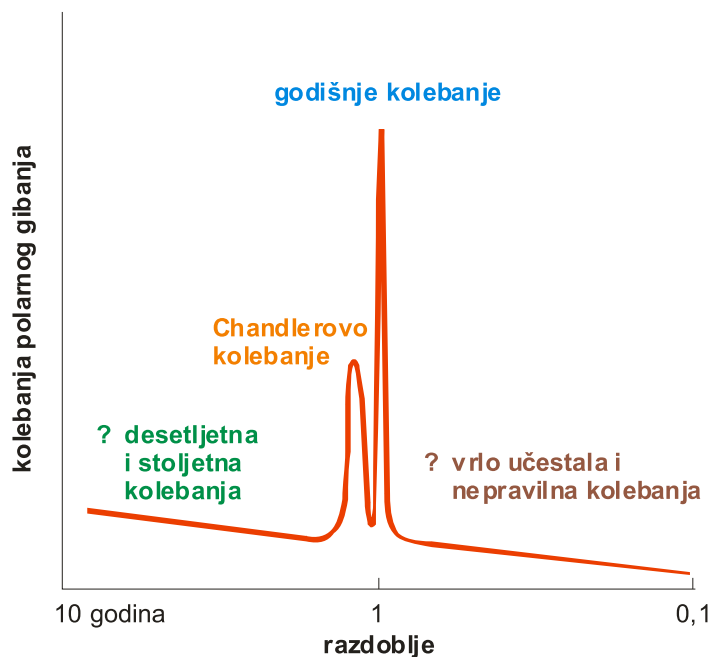
MEĐUNARODNA SLUŽBA ŠIRINE

INTERNATIONAL LATITUDE SERVICE (ILS)



IZ MNOGOBROJNIH ODREĐIVANJA ASTRONOMSKE ŠIRINE UTVRĐENA SU KOLEBANJA POLA:

- **CHANDLEROVO KOLEBANJE OD 14 MJESECI (1,2 godine)**
- **GODIŠNJE (I POLUGODIŠNJE) KOLEBANJE**



VRLO UČESTALA I NEPRAVILNA KOLEBANJA (na granici mjerljivosti)

- meteorologija, zemljotres

GODIŠNJE KOLEBANJE

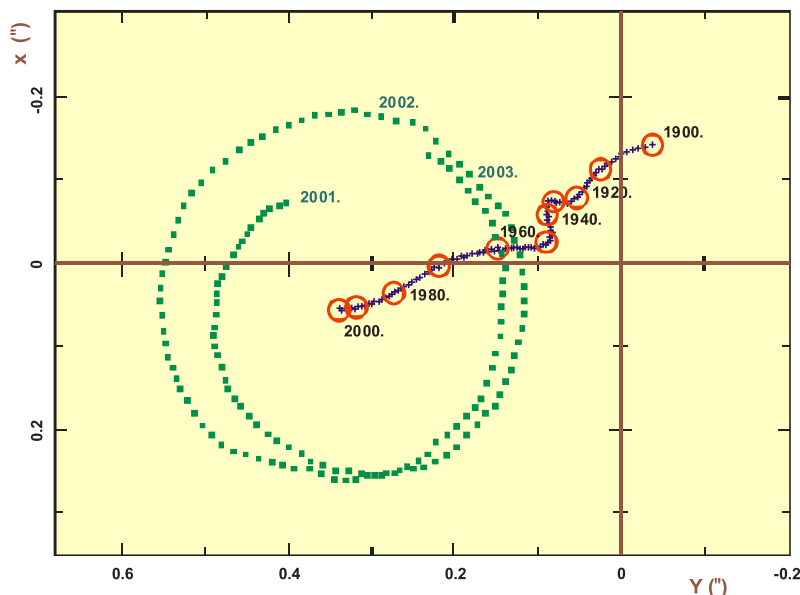
- gibanja zračnih mase, Zemljinih voda,
- razina morskih površina

DESETLJETNA I STOLJETNA KOLEBANJA

- gibanje mora, tektonika ploča

PREMJEŠTANJE SREDNJEG POLA PREMA IERS REFERENTNOM OKVIRU (1900.- 2002.)

GODIŠNJE GIBANJE POLA (2001.- 2003.)



**X = greenwichki meridijan,
Y = 90 W**

CIO OSI

(CONVENTIONAL INTERNATIONAL
ORIGIN, 1900,0 – 1906,0)

BTS OSI

(BIH TERRESTRIAL SYSTEM)
KONZISTENTNE S CIO OSIMA
($\pm 0.03''$)

ITRF OSI

(INTERNATIONAL TERRESTRIAL
REFERENCE FRAME)
KONZISTENTNE S BTS OSIMA
($\pm 0.005''$)

REDUKCIJA ŠIRINE I DULJINE S TERNUTAČNOG NA SREDNJI POL

ASTRONOMSKA ŠIRINA (<0,6'')

$$\Phi_{sp} = \Phi - (x \cos \Lambda - y \sin \Lambda)$$

ASTRONOMSKA DULJINA (do 0,02^s)

$$\Lambda_{sp} = \Lambda - (x \sin \Lambda + y \cos \Lambda) \operatorname{tg} \Phi$$

Φ_{sp} , Λ_{sp} – širina i duljina svedena na srednji pol

Φ , Λ – mjerena (trenutačna) širina i duljina

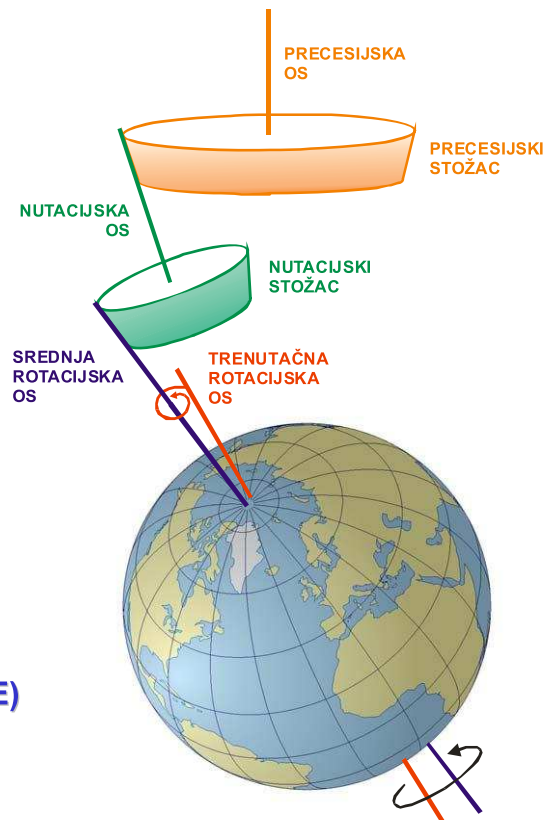
x , y – pravokutne koordinate trenutačnog Zemljinog pola

PROMJENE KOORDINATA NEBESKIH TIJELA

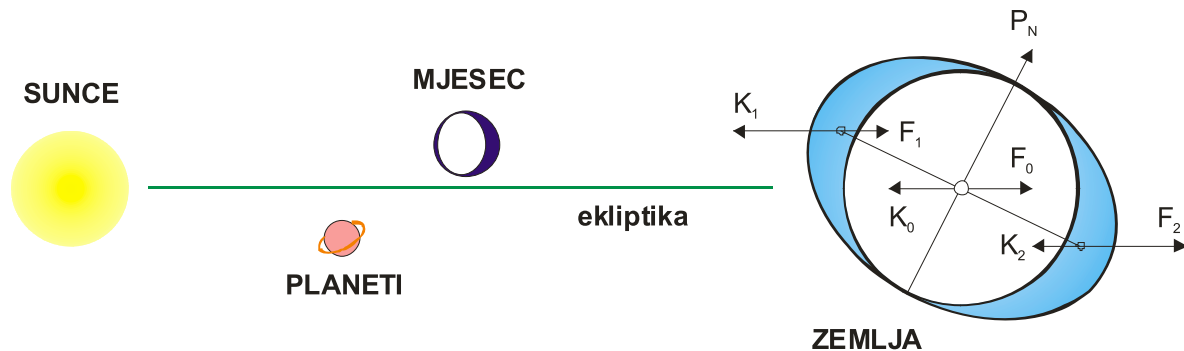
(s obzirom na gibanja koordinatnih sustava, odnosno promjene prostorne orijentacije koordinatnih osi)

STALNA VREMENSKA PROMJENA POLOŽAJA ZEMLJINE ROTACIJSKE OSI (SVJETSKE OSI) I EKLIPTIČKE OSI U PROSTORU, ZBOG SLOŽENIH UZAJAMNIH GRAVITACIJSKIH DJELOVANJA TIJELA SUNČEVA SUSTAVA (POGLAVITO SUNCA I MJESECA) NA SPLJOŠTENU ZEMLJU I ORBITALNE ELEMENTE ZEMLJINE STAZE

- DUGOPERIODIČNO (SEKULARNO) GIBANJE NEBESKIH POLOVA ZBOG LUNI-SOLARNE PRECESIJE
- POMACI EKLIPTIČKIH POLOVA ZBOG PLANETSKE PRECESIJE
- KRATKOPERIODIČKI POMACI (OSCILACIJE) NEBESKIH POLOVA OKO NJIHOVOG SREDNJEG POLOŽAJA ZBOG NUTACIJE



- ZBOG ZEMLJINE SPLJOŠTENOSTI I GRAVITACIJSKIH UTJECAJA DRUGIH NEBESKIH TIJELA, ORIJENTACIJA ZEMLJINE ROTACIJSKE OSI SLOŽENO SE MIJENJA TIJEKOM VREMENA
- GRAVITACIJSKI SU UTJECAJI NEPOSREDNO RAZMJERNI MASAMA TIJELA A OBRNUTO RAZMJERNI KUBU NJIHOVE UDALJENOSTI OD ZEMLJE (MJESEČEV JE UTJECAJ DVOSTRUKO JAČI OD SUNČEVOG DOK SU UTJECAJI PLANETA PRAKTIČNO ZANEMARIVI)



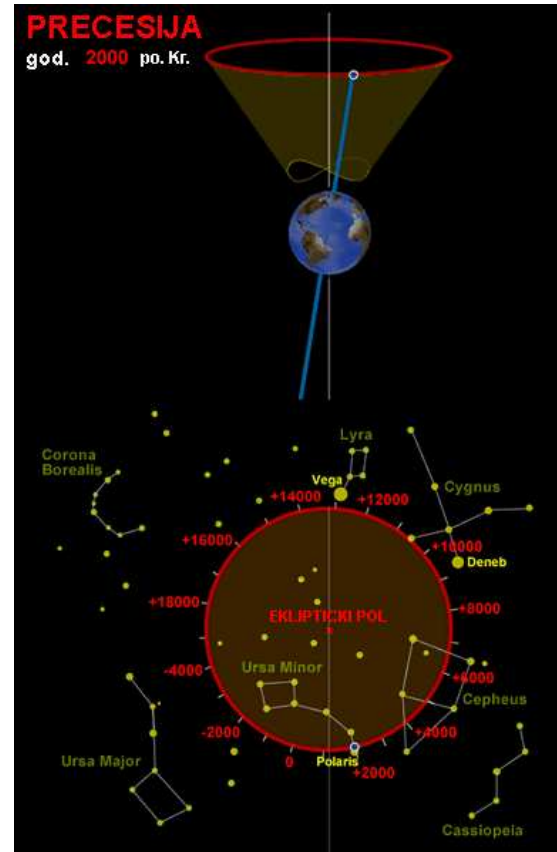
- GRAVITACIJSKO DJELOVANJE PLANETA IMA ZA POSLJEDICU DA SE RAVNINA ZEMLJINE STAZE ZAKREĆE U PROSTORU

PRECESIJA

- **LUNI-SOLARNA PRECESIJA** – DUGOPERIODIČNO (SEKULARNO) GIBANJE NEBESKIH POLOVA ZBOG GRAVITACIJSKIH UTJECAJA MJESECA I SUNCA NA ZEMLJINA EKVATORSKA ISPUPČENJA
- **PLANETSKA PRECESIJA** – GIBANJE EKLIPTIČKIH POLOVA ZBOG GRAVITACIJSKIH UTJECAJA PLANETA
- **OPĆA PRECESIJA** – UKUPNI UČINAK LUNISOLARNE I PLANETSKE PRECESIJE

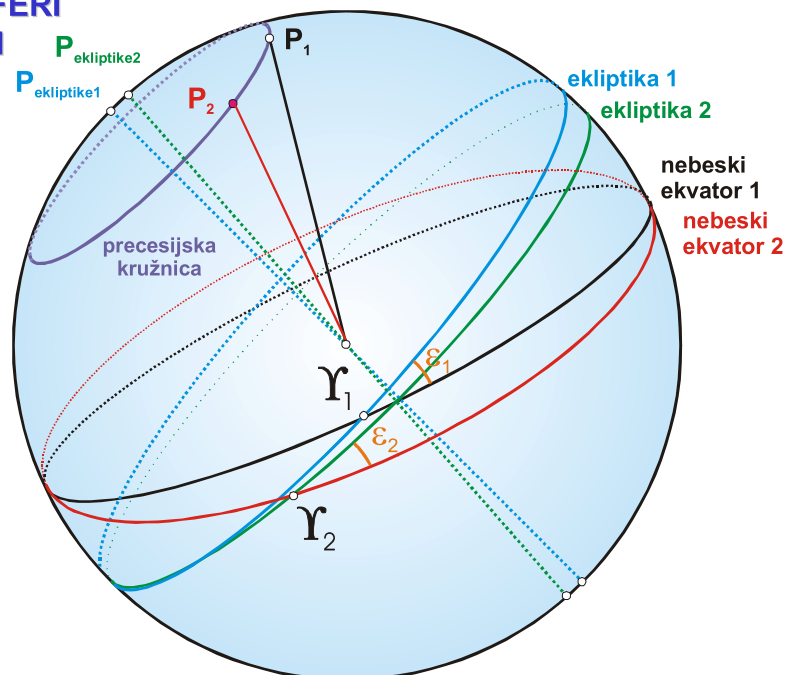
- **PERIOD LUNI-SOLARNE PRECESIJE IZNOSI 25920 GODINA (PLATONOVA GODINA) I U TOM PERIODU NEBESKI POLOVI JEDNOM OBIĐU OKO EKLIPTIČKIH POLOVA, A PROLJETNA I JESENSKA TOČKA OPIŠU PUNI KUT PO EKLIPTICI**
- **zbog precesije danas je proljetna točka u zviježđu Riba (znak Ovna) a jesenska u zviježđu Djevica (znak Vage)**

- **DANAS** sjeverni nebeski pol u blizini Polarnice (2100. g. Polarnica najbliža polu 27')
- **POČETKOM NOVE ERE** Kochab (Herkul) bila je najbliža polu
- **oko 9000. g.** Deneb (Labud) bit će najbliži polu
- **oko 13000 g.** Vega (Lira) bit će najbliža polu



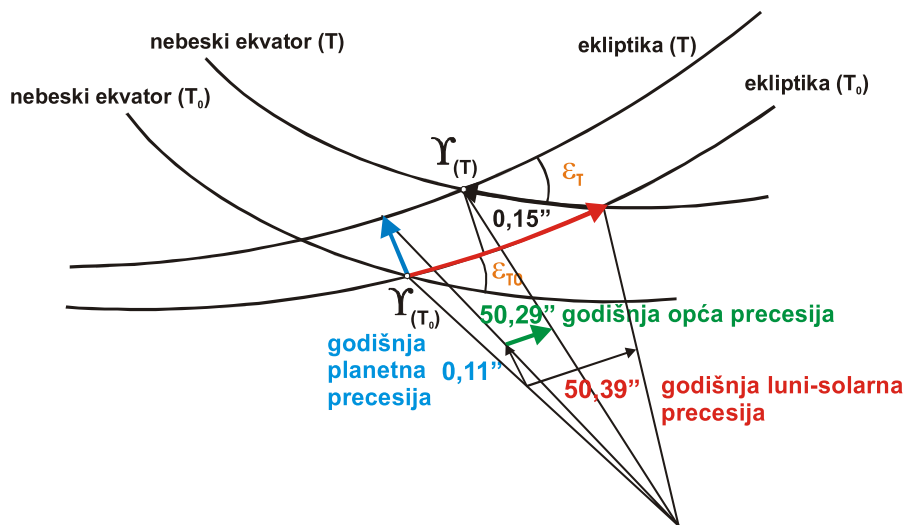
PLANETSKA PRECESIJA

- **ZAKRETANJE (NJIHANJE) EKLIPTIČKE RAVNINE U PROSTORU ZBOG GRAVITACIJSKIH DJELOVANJA PLANETA, ŠTO IMA ZA POSLJEDICU PROMJENU POLOŽAJA EKLIPTIČKIH POLOVA NA NEBESKOJ SFERI I PROMJENU VRIJEDNOSTI PRIKLONA NEBESKOG EKVATORA PREMA EKLIPTICI**



OPĆA PRECESIJA

- UZAJAMNO DJELOVANJE LUNI-SOLARNE I PLANETNE PRECESIJE, ODNOSNO UKUPNI POMAK EKVATORSKE I EKLIPTIČKE RAVNINE



- GODIŠNJA LUNI-SOLARNA PRECESIJA **50,39''** (pomak $\Upsilon_{(T_0)}$ po ekliptici)
- GODIŠNJA PLANETNA PRECESIJA **0,11''** (zakretanje ekliptike) (zbog toga proljetna točka klizi i po nebeskom ekvatoru **0,15''/god.**)
- GODIŠNJA OPĆA PRECESIJA **50,29''** ($\Upsilon_{(T_0)} \Rightarrow \Upsilon_{(T)}$)

RAČUNANJE PRECESIJE

$$P = r(-z_A) q(\theta_A) r(-\xi_A)$$

p, q, r – operatori rotacije troosnog sustava za proizvoljni kut α
 ζ_A, z_A, θ_A – parametri precesije (kutovi koji određuju položaj srednjeg ekvinocija i ekvatora odabranog datuma u odnosu na srednji ekvinocij i ekvator inicijalne epohe)

$$p, q(a) = \begin{pmatrix} \cos a & 0 & -\sin a \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin a & 0 & \cos a \end{pmatrix}, \quad r$$

$$\xi_A = 0,6406161 T + 0,0000839 T^2 + 0,00000501 T^3$$

$$T = (t - 2000,0)/100 = (JD - 245\,1545,0)/36525$$

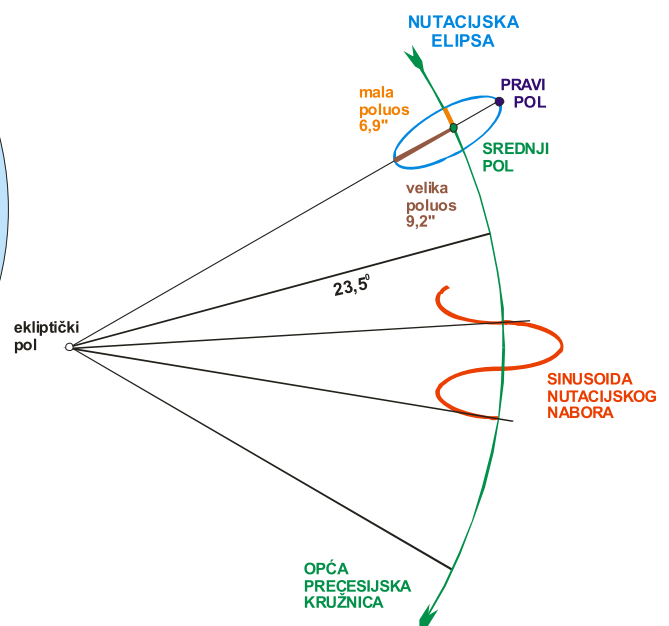
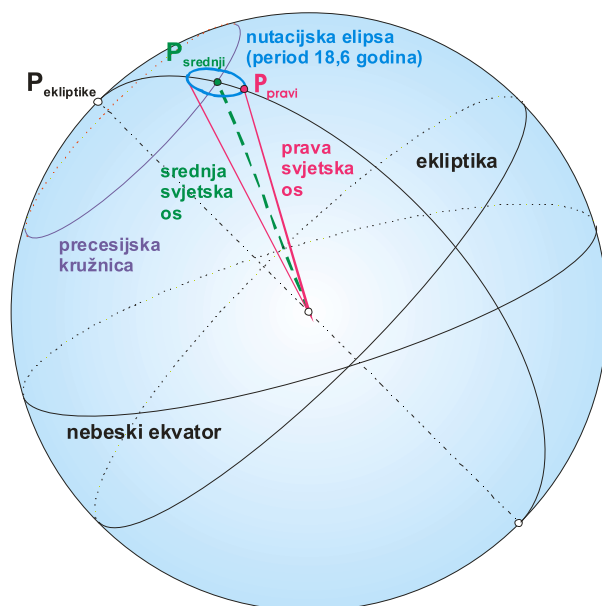
t – odabrani datum

JD – julijanski datum

NUTACIJA

- KRATKOPERIODIČNO OSCILIRANJE PRAVE SVJETSKE OSI OKO NJENOG SREDNJEG POLOŽAJA (DEFINIRANOG LUNI-SOLARNOM PRECESIJOM)
- NUTACIJA JE POSLJEDICA PROMJENJIVIH GRAVITACIJSKIH DJELOVANJA MJESECA I SUNCA NA ZEMLJU, NAIME STALNE PROMJENE UZAJAMNIH POLOŽAJA SUNCA, MJESECA I ZEMLJE UZROK SU PROMJENAMA GRAVITACIJSKIH DJELOVANJA KAKO PO IZNOSU TAKO I PO SMJERU

- ZBOG NUTACIJE ZEMALJINA OS NE PRAVI PRAVILNU PRECESIJSKU KRUŽNICU, VEĆ SU NA KRUŽNICI IZRAŽENI TZV. NUTACIJSKI NABORI (SINUSOIDA JEDNOG NUTACIJSKOG NABORA TRAJE 18,6 GODINA)



RAČUNANJE NUTACIJE

- pomak pravog nebeskog pola u odnosu na srednji pol opisan je s dvije veličine:
 - $\Delta\Psi$ – nutacija po longitudi
 - $\Delta\varepsilon$ – nutacija po priklonu ekvatora prema ekliptici

$$N_{\Lambda} = \Delta\Psi = \Delta\psi + d\psi \quad (J2000,0)$$

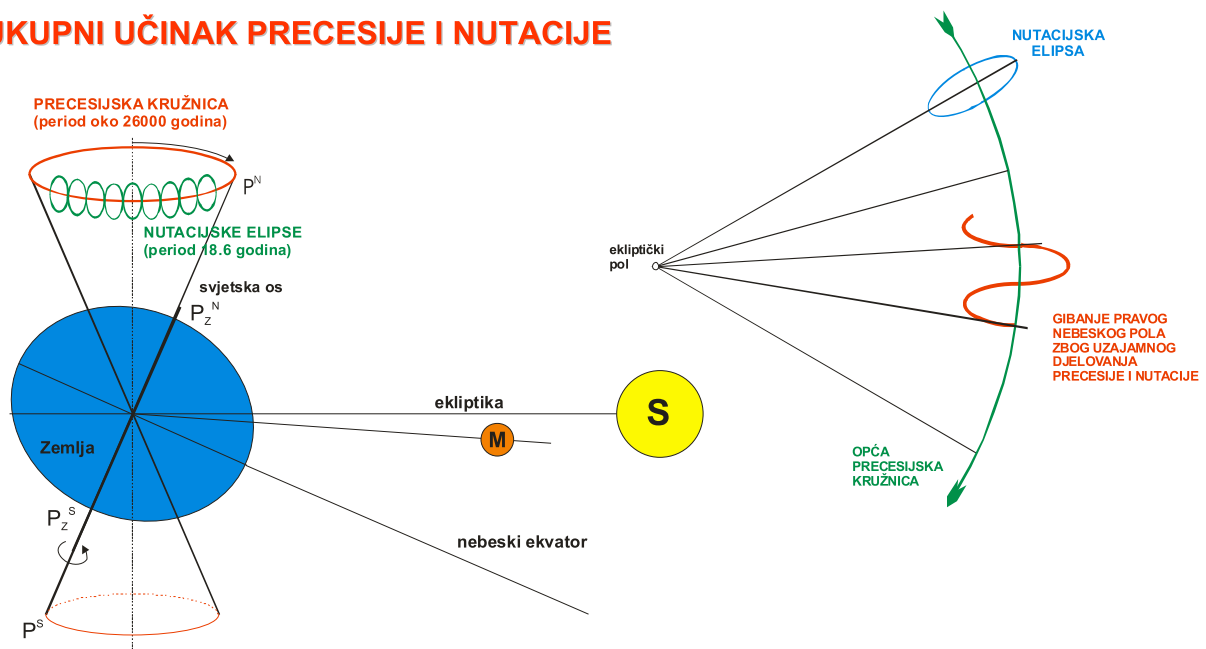
$$\Delta\psi = -(17,199'' + 0,01742''T)\sin\Omega + (0,2062'' + 0,00002''T)\sin 2\Omega - \dots$$

$$d\psi = -(0,2274'' + 0,00002''T)\sin 2\Theta + (0,0712'' + 0,00001''T)\sin l - \dots$$

$$\Omega = 450160,280'' - (6480000'' + 482890,539'')T + 7,455''T^2 + 0,008''T^3$$

- $\Delta\Psi$ – dugoperiodički član nutacije u longitudi
- $d\Psi$ – kratkoperiodički član nutacije u duljini
- T – dio Julijanskog stoljeća od J2000,0
- Ω – srednja duljina uzlaznog čvora Mjesečeve putanje
- L – srednja duljina Sunca
- Θ – srednja duljina Mjeseca
- l – srednja anomalija Mjeseca

UKUPNI UČINAK PRECESIJE I NUTACIJE



- zbog toga što precesija i nutacija mijenjaju prostornu orijentaciju koordinatnih osi neophodno je pri definiranju koordinata nebeskih tijela istaknuti na koji se trenutak (epohu) koordinate odnose
- znajući kako precesija i nutacija tijekom vremena mijenjaju prostornu orijentaciju koordinatnih osi možemo tada i preračunati koordinate iz zadane u proizvoljnu epohu

VLASTITA GIBANJA ZVIJEZDA

- **VRLO SLOŽENA GIBANJA SUNCA I ZVIJEZDA I PRETEŽITO SU POSLJEDICA VRTNJE NAŠE GALAKTIKE**
- **RADIJALNA KOMPONENTA - U SMJERU ZVIJEZDE**
- **TANGENCIJALNA KOMPONENTA - OKOMITO NA SMJER ZVIJEZDE**
- **NEKOLIKO ZVIJEZDA IMA GODIŠNJE VLASTITO KRETANJE VEĆE OD 1" (NAJVEĆI GODIŠNJI POMAK IMA BARNARDOVA ZVIJEZDA $\approx 10,3''$)**
- **VRLO MALE VRIJEDNOSTI (ISKAZUJEMO IH U INTERVALU OD 100 GODINA)**
- **ODREĐIVANJE VLASTITOG KRETANJA IZVODI SE USPOREDBOM VIŠEGODIŠNJIH PRECIZNIH MJERENJA POLOŽAJA ZVIJEZDA**

IZBOR KOORDINATNOG SUSTAVA U ASTRONOMIJI (II)

JEDNOZNAČNOST U DEFINIRANJU KOORDINATA NEBESKIH TIJELA

- **NA KOJI SE VREMENSKI TRENUTAK (DATUM, EPOHU) KOORDINATE ODNOSE**
- **KOJA JE TOČKA ODABRANA ZA SREDIŠTE NEBESKE SFERE (I ISHODIŠTE KOORDINATNOG SUSTAVA)**
- **KAKO SU DEFINIRANI EKVATOR I EKVINOCIJ**

NORMIZACIJA I PRIPADNA TERMINOLOGIJA

- **DA BI UOČILI RAZLIKU IZMEĐU PROMJENJLJIVIH KOORDINATA NEBESKIH TIJELA ILI ELEMENATA NEBESKE SFERE (POL, EKVINOCIJ, EKVATOR, ...) U ODNOSU NA KONKRETNI KOORDINATNI SUSTAV "KOJI SE GIBA" UPOTREBLJAVAJU SE DOGOVORENI (STANDARDIZIRANI, USVOJENI) IZRAZI**

SREDNJA I PRIVIDNA MJESTA – KOORDINATE NEBESKIH TIJELA

SREDNJE MJESTO (MEAN PLACE)

GEOCENTRIČKI POLOŽAJ NEBESKOG TIJELA NA HELIOCENTRIČKOJ NEBESKOJ SFERI U ODNOSU NA SREDNJI EKVATOR I EKVINOCIJ STANDARDNE EPOHE

- **SREDNJA MJESTA DOBIJU SE TAKO DA SE IZ NEPOSREDNO ODREĐENIH POLOŽAJA OTKLONE UČINCI REFRAKCIJE, DNEVNE (GEOCENTRIČNE) I ZVJEZDANE PARALAKSE I ZVJEZDANE ABERACIJE, TE KOORDINATE ISKAŽU U ODNOSU NA SREDNJI EKVATOR I EKVINOCIJ ZA STANDARDNU EPOHU (pri izradi zvjezdanih kataloga bila je praksa da se ne uklanjaju učinci sekularne komponente zvjezdane aberacije)**

EKVINOCIJ

- 1) jedna od dviju točaka nebeske sfere u kojoj ekliptika presijeca nebeski ekvator;
- 2) vrijeme u kojem Sunce dolazi u te točke, tj. kada je prividna duljina Sunca 0° ili 180° , također i ravnodnevica, ravnonoćje

SREDNJI EKVATOR I EKVINOCIJ

- nebeska referentna kružnica i točka nebeskog referentnog koordinatnog sustava određenog srednjim položajem nebeskog ekvatora i ekliptike, zanemarujući kratkoperiodične oscilacije nebeskog ekvatora
- srednji ekvator i ekvinocij podložni su samo promjenama položaja uslijed precesije

- **KATALOŠKI POLOŽAJI ZVIJEZDA OBIČNO SU DANI U ODNOSU NA SREDNJI EKVATOR I EKVINOCIJ STANDARDNE EPOHE (NEKAD BESSELOVA, A DANAS JULIJANSKA EPOHA)**
- **U ASTRONOMSKIM GODIŠNJACIMA SREDNJE KOORDINATE ZVIJEZDA OBIČNO SU DANE U ODNOSU NA SREDINU GODINE JULIJANSKE EPOHE (NEKAD U ODNOSU NA BESSELOV POČETAK ILI SREDINU GODINE BESSELOVE EPOHE)**

SREDNJA I PRIVIDNA MJESTA – KOORDINATE NEBESKIH TIJELA

PRIVIDNO MJESTO (APPARENT PLACE)

POLOŽAJ NEBESKOG TIJELA NA GEOCENTRIČNOJ NEBESKOJ SFERI U ODNOSU NA PRAVI EKVATOR I EKVINOCIJ

- **PRIVIDNA MJESTA DOBIJU SE TAKO DA SE IZ NEPOSREDNO ODREĐENIH POLOŽAJA OTKLONE UČINCI KOJI OVIŠE O TOPOCENTRIČNOM POLOŽAJU MOTRITELJA (REFRAKCIJA, DNEVNA ABERACIJA I DNEVNA PARALAKSA) TE KOORDINATE ISKAŽU U ODNOSU NA PRAVI EKVATOR I EKVINOCIJ**

PRAVI EKVATOR I EKVINOCIJ

- **nebeska referentna kružnica i točka nebeskog koordinatnog sustava određenog trenutnim (pravim) položajem nebeskog ekvatora i ekliptike**
- **taj se koordinatni sustav giba uslijed precesije i nutacije**