

Izbrana poglavja iz višje geodezije in geodetske astronomije
2024/2025

NEBESNI KOORDINATNI SISTEMI

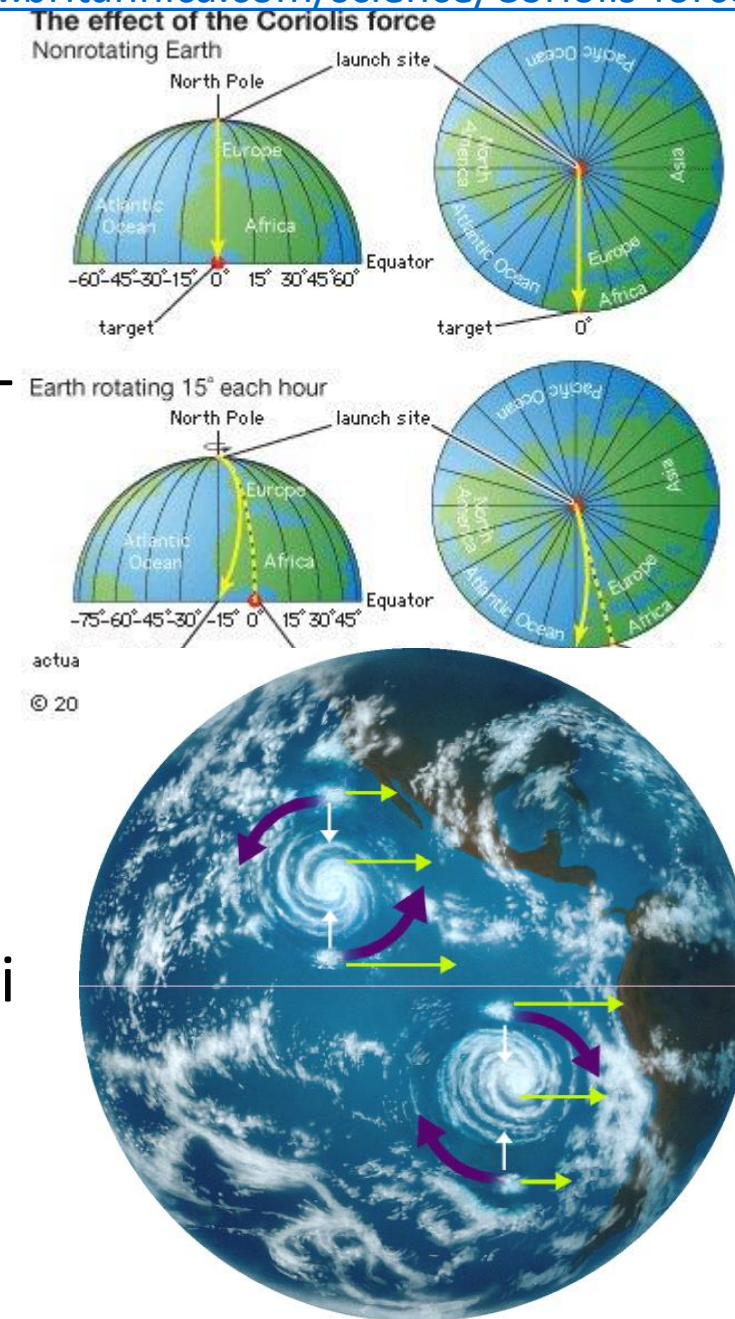
doc. dr. Oskar Sterle

UVOD

- Osnovni namen nebesnih koordinatnih sistemov: *določitev položajev satelitov, planetov, zvezd, galaksij in drugih nebesni teles – vseh teles, ki niso pričvrščena na Zemljo*
- Pred satelitsko geodezijo:
 - Edini sistem za določanje položaja globalno
 - Navigacija – na morju, na kopnem
 - Zagotovitev osnove za državne koordinatne sisteme (astro-geodetski datum)
- V času satelitske geodezije:
 - Temeljni koordinatni sistemi (sateliti GNSS so tudi „nebesna“ telesa)
 - VLBI osnovno orodje vzpostavitve in vzdrževanje nebesnih sistemov
 - Kaj narediti v odsotnosti GNSS (npr. Sibirija, -50°C)?
- Le nebesni koordinatni sistem je lahko INERCIALNI koordinatni sistem
 - Koordinatni sistem, ki ni podvržen pospešenemu gibanju (zunanjim silam)
 - **Le v INERCIALNEM koordinatnem sistemu lahko opišemo gibanje nebesnih teles in Zemlje z Newtonovimi zakoni gibanja**

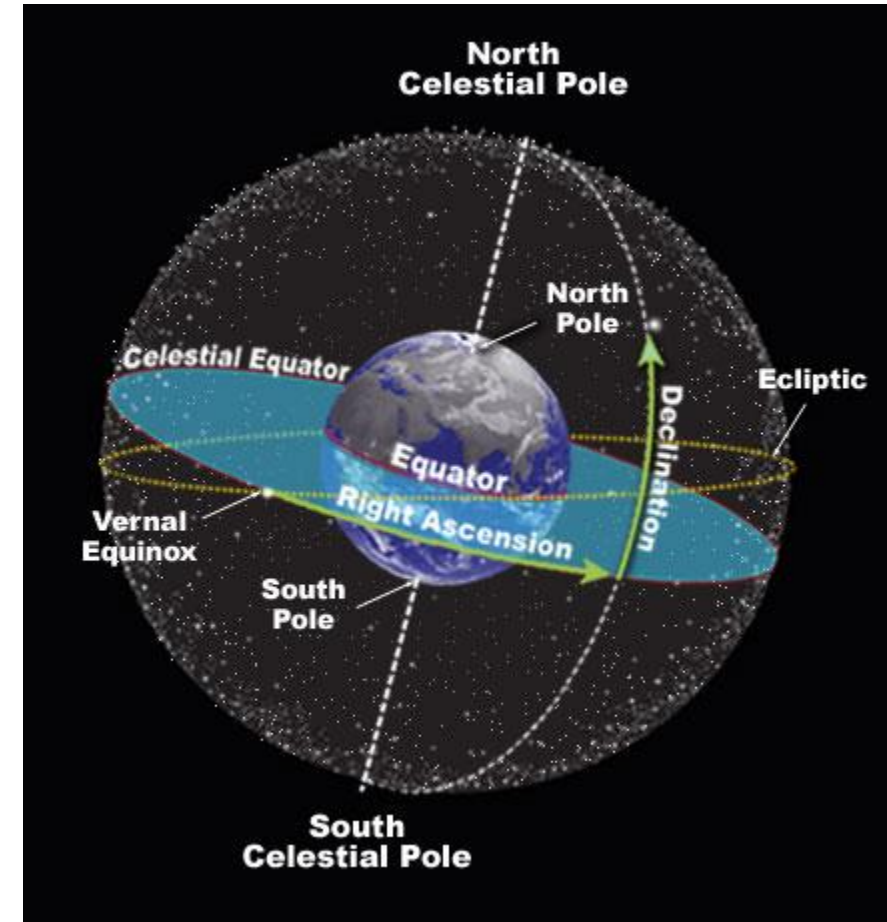
UVOD

- Terestrični koordinatni sistemi NISO inercialni sistemi – so pričvrščeni na telo Zemljo, ki ROTIRA
- Vsa telesa na Zemlji so podvržena centripetalni sili
- Efekti, ki se pojavi: Coriolisova sila (npr. orkani)
- Zemlja tudi kroži okoli Sonca – pospešeno gibanje
- Tak sistem je lahko le v težišču solarnega sistema in glede na zvezde ne rotira
- Primer: ICRS sistem službe IERS, vzpostavljen na osnovi VLBI opazovanj
- Osnovne razlike med nebesnimi in TRS:
 - pomembne so samo smeri (dolžin ni)
 - uporaba sferne geometrije namesto elipsoidne (poenostavitve)



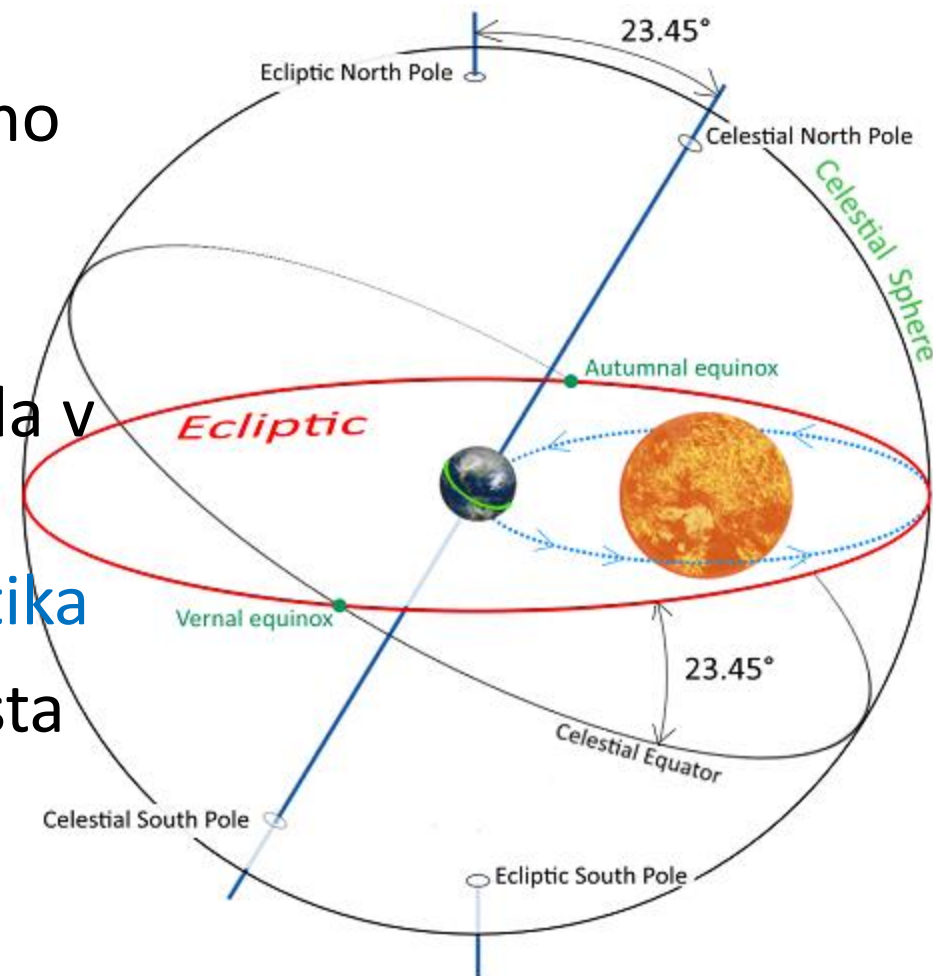
OSNOVNA IZHODIŠČA - PREDPOSTAVKE

- Najbližja zvezda je oddaljena več kot 10^9 polmerov Zemlje
- Velikost Zemlje je „zanemarljiva“ – točkasto telo
- Velikost našega osončja je „zanemarljiva“
- Gibanje zvezd je zelo majhno (zaradi velikih razdalj, ne preseže 1" na leto) ali ga sploh ne zaznamo (kvazarji)
- Dimenzije so tako velike, da vse reduciramo na enoto 1 – nebesni sistemi so brez-dimenzijski
- Vsa nebesna telesa projiciramo na **nebesno sfero**



NEBESNA SFERA

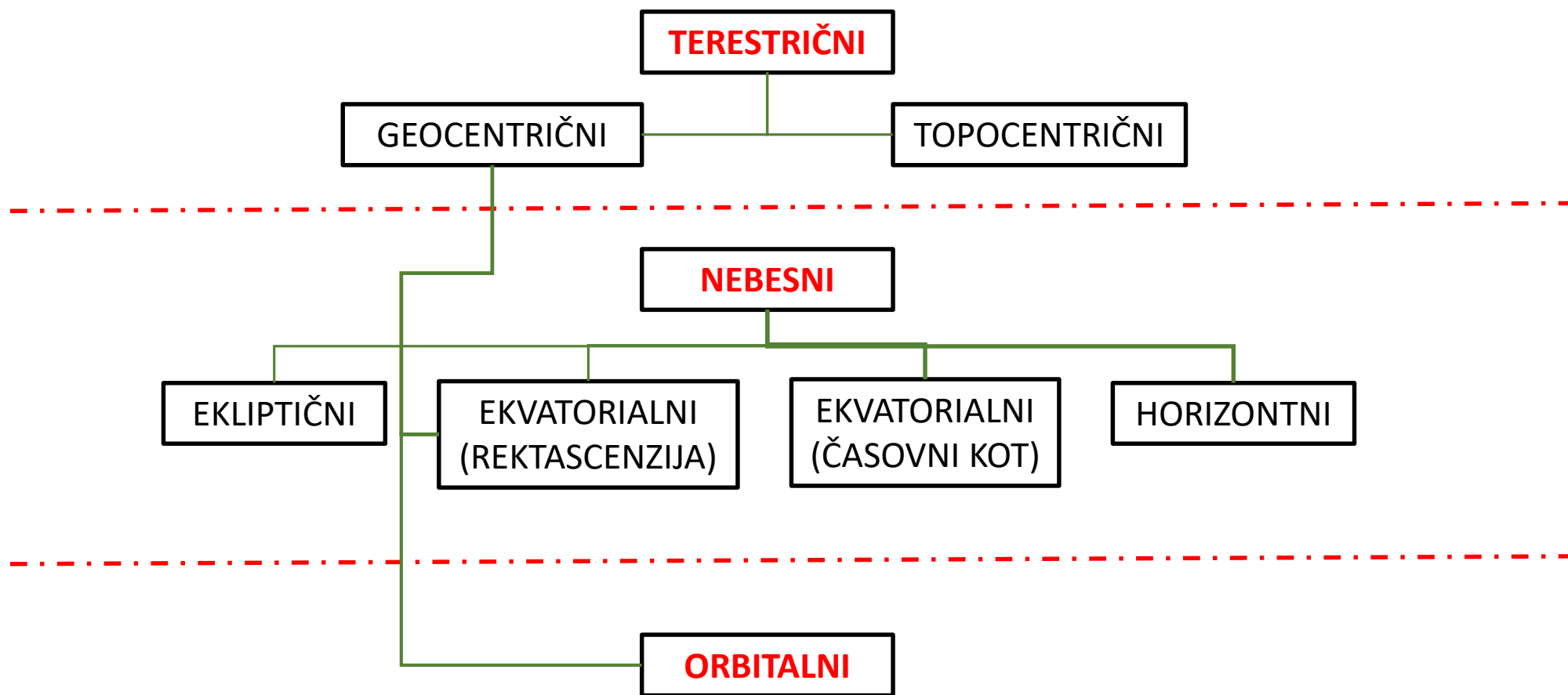
- Rotacijsko os podaljšamo da prebode nebesno sfero v **S in J nebesnem polu**
- Zemljin ekvator se razširi v **nebesni ekvator**
- Navpičnica skozi točko nebesno sfero prebada v **zenitu** in **nadirju**
- Ravnina kroženja Zemlje okoli Sonca je **ekliptika**
- Presečišče nebesnega ekvatorja in ekliptike sta smeri proti **pomladišču** (Vernal equinox) in **jeseňišču** (Autumnal equinox)



GIBANJE ZEMLJE IN NEBESNA SFERA

- Kakšna je lega in orientacija Zemlje glede na nebesno sfero
- Gibanje Zemlje
 - Rotacija okoli lastne osi
 - Kroženje okoli Sonca
- Orientacija rotacijske osi Zemlje
 - Precesija in nutacija
 - Gibanje polov
- Smeri zvezd glede na gibanje Zemlje in njene rotacijske osi
 - gibanje zvezd (pravo gibanje)
 - dnevna (rotacija Zemlje) in letna (kroženje okoli Sonca) paralaksa – različni položaji
 - aberacija (kroženje okoli Sonca) – posledica hitrosti gibanja
 - refrakcija

NEBESNI KOORDINATNI SISTEMI



DEFINIRANJE NEBESNEGA KOORDINATNEGA SISTEMA

- Temelj – orientacija koordinatnega sistema
- Definiranje orientacije:
 - poli (nadir-zenit, rotacijska os, ekliptični pol)
 - ravnine (horizontalna, ekvatorialna, ekliptična, začetni meridian)
 - smeri koordinatnih osi
 - sučnost (desna, leva)
- Izhajamo iz naravnih “smeri” – rotacijska os, težiščnica, pomladišče
- lahko tudi poljubno – izbira začetnega meridiana
- izhodišče ni pomembno – opazovališče, težišče Zemlje, baricenter Zemlja-Luna, težišče Sonca, težišče sončnega sistema...
 - smeri do zelo oddaljenih nebesnih teles ostajajo (praktično) ista!
 - Bolj pomembno – inercialnost (gibanje središča!)

HORIZONTALNI NEBESNI KOORDINATNI SISTEM

- Osnovna Z os: smer zenita (težnost)
- Osnovna ravnina: horizontalna ravnina opazovališča
- Sekundarna X os: v smeri „astronomskega severa“
- Terciarna Y os: smer „astronomskega vzhoda“ – **levosučen** sistem
- Izhodišče: lahko opazovališče, tudi težišče osončja
- Ekvivalenten geodetskemu sistemu LA
- Rotira skupaj z Zemljo
- Opazovanja do zvezd so odvisna od lege opazovališča in trenutka izmere

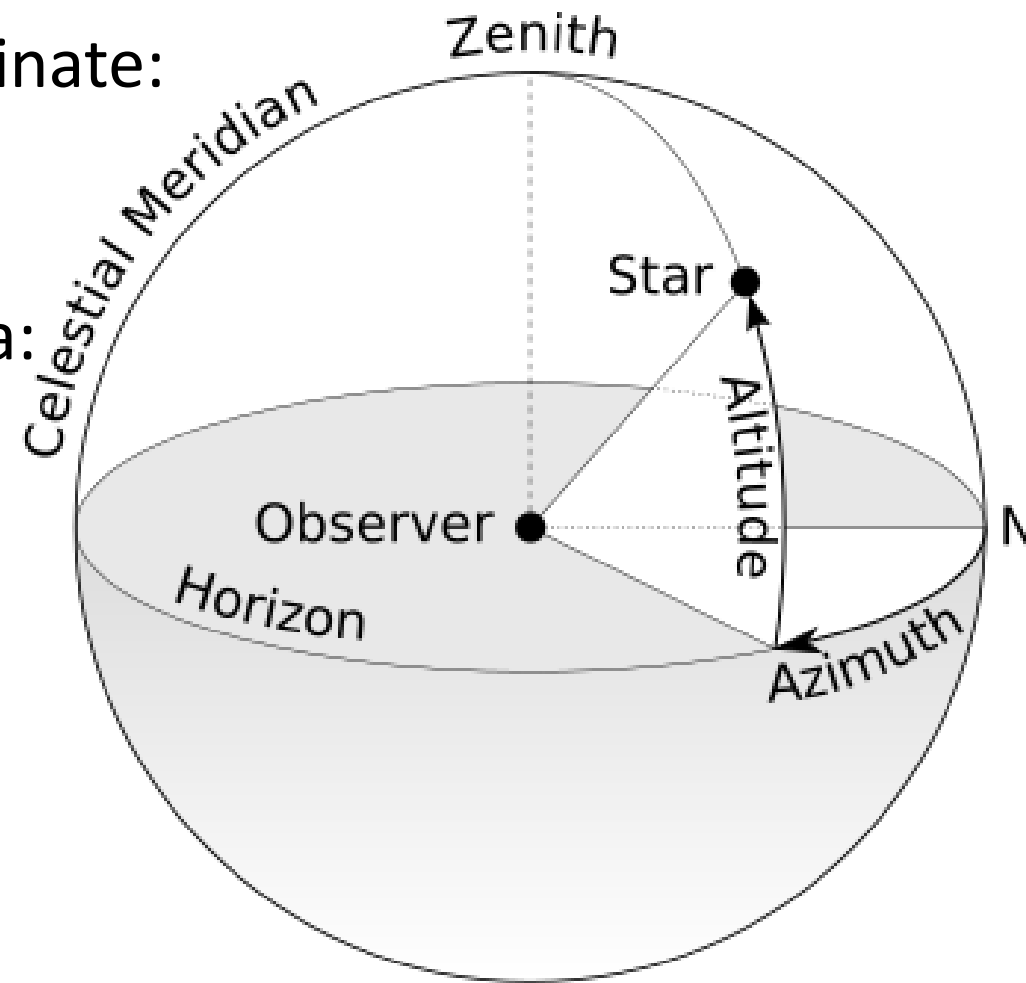
HORIZONTALNI NEBESNI KOORDINATNI SISTEM

- Položaj nebesnega telesa - sferne koordinate:

- višinski kot e ali zenitna razdalja z
- azimut A

- Kartezične koordinate – enotska krožnica:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_H = \begin{bmatrix} \cos e \cos A \\ \cos e \sin A \\ \sin e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin z \cos A \\ \sin z \sin A \\ \cos z \end{bmatrix}$$



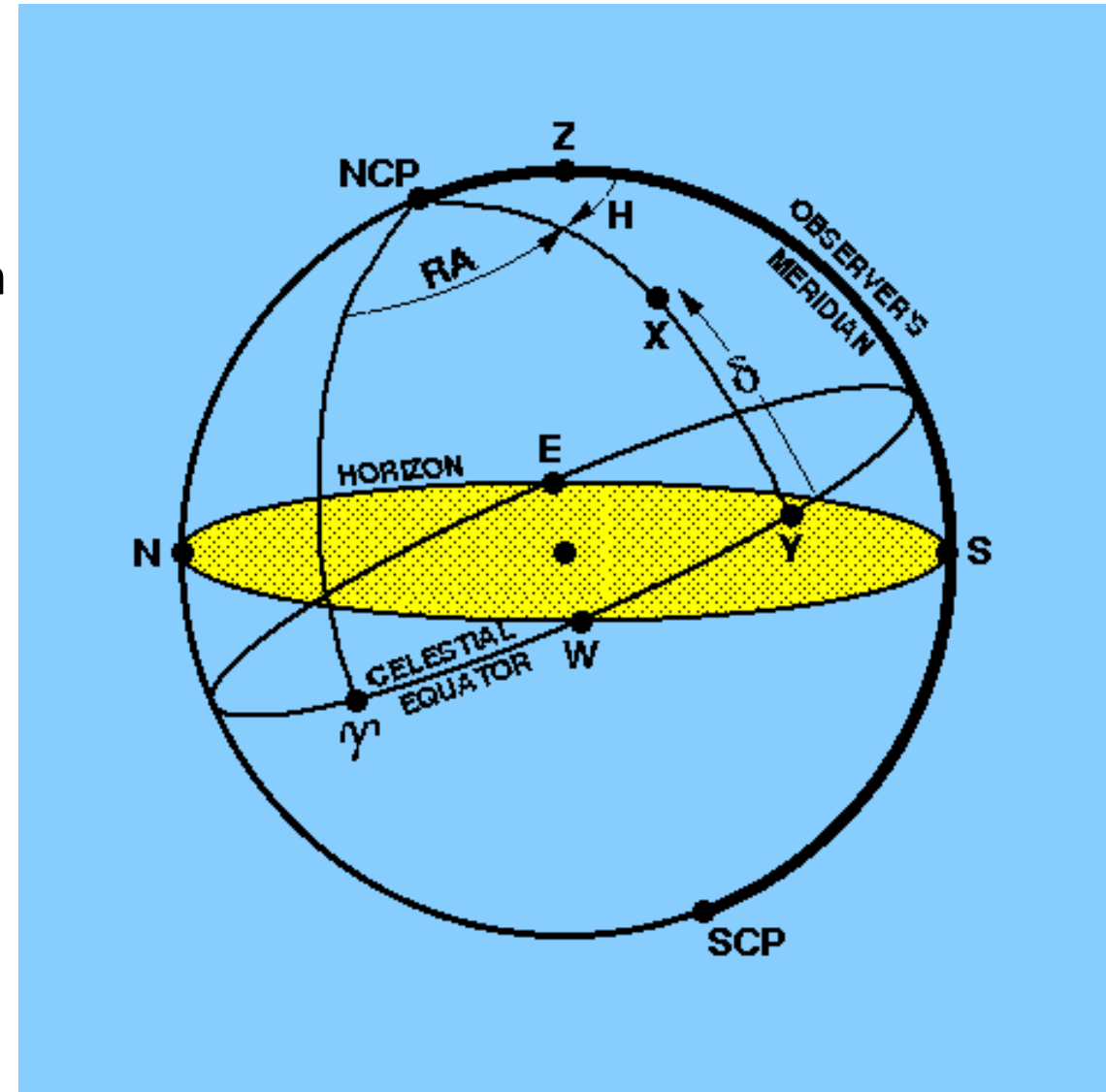
EKVATORSKI NEBESNI SISTEM ČASOVNEGA KOTA

- Osnovna Z os: rotacijska os Zemlje
- Osnovna ravnina: nebesni ekvator
- Sekundarna X os: nebesni meridian opazovališča – smer juga
- Terciarna Y os: **levosučen** sistem
- Izhodišče: lahko težišče Zemlje, tudi težišče osončja
- Rotira skupaj z Zemljo

EKVATORSKI NEBESNI SISTEM ČASOVNEGA KOTA

- Sferni koordinati:
 - deklinacija δ – kot med nebesnim ekvatorjem in smerjo (izhodišča) proti zvezdi
 - časovni kot h - kot v ravnini nebesnega ekvatorja med nebesnim meridianom opazovališča in meridianom zvezde, merjeno v smeri zahoda (angl. hour angle HA)
- Kartezične koordinate – enotska krožnica:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{HA} = \begin{bmatrix} \cos \delta \cos h \\ \cos \delta \sin h \\ \sin \delta \end{bmatrix}$$



TRANSFORMACIJA: HORIZONTNI - EKVATORIALNI (ČASOVNI KOT)

- Povezava med obema sistemoma je podana preko astronomske širine opazovališča Φ :
- Transformacija iz ekvatorskega v horizontni sistem

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_H = R_z(180^\circ) R_y(90^\circ - \Phi) \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{HA}$$

1. uskladimo Z osi obeh sistemov ($R_y(90^\circ - \Phi)$)
2. uskladimo X osi obeh sistemov ($R_z(180^\circ)$)

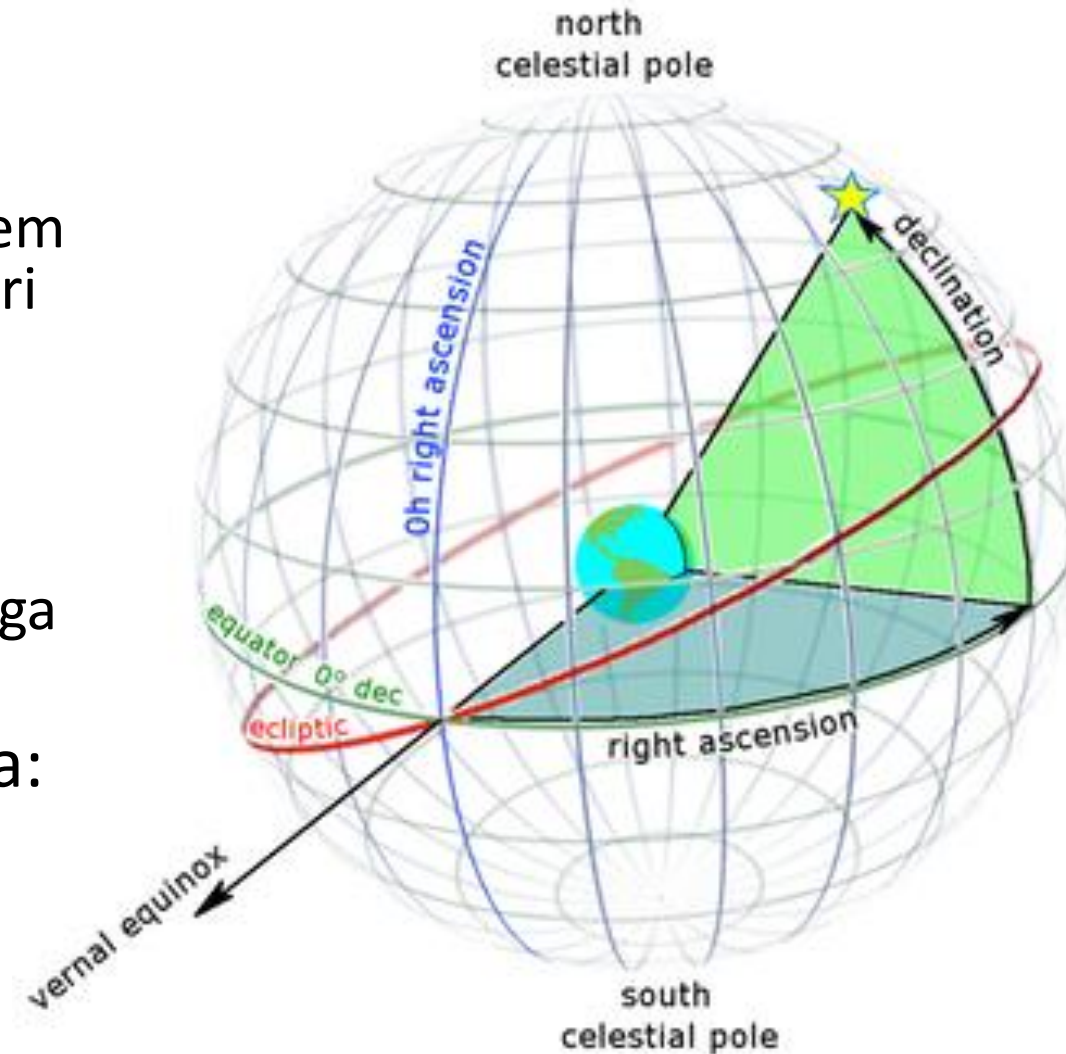
EKVATORSKI NEBESNI SISTEM REKTASCENZIJE

- Osnovna Z os: rotacijska os Zemlje
- Osnovna ravnina: nebesni ekvator
- Sekundarna X os: pomladišče
- Terciarna Y os: **desnosučen** sistem
- Izhodišče: lahko težišče Zemlje, tudi težišče osončja
- Pričvrščen na nebesna telesa – Zemlja v tem sistemu rotira (in se premika)
- Inercialni sistem
- Najpomembnejši nebesni sistem:
 - v tem sistemu so objavljene koordinate nebesnih teles
 - povezava med terestričnim, nebesnim in orbitalnim sistemom

EKVATORSKI NEBESNI SISTEM REKTASCENZIJE

- Sferni koordinati:
 - deklinacija δ – kot med nebesnim ekvatorjem in smerjo (izhodišča) proti zvezdi (isto kot pri sistemu časovnega kota)
 - rektascenzija α - kot v ravnini nebesnega ekvatorja med pomladiščem in nebesnim meridianom zvezde, merjeno v nasprotni smeri urinega kazalca gledano iz S nebesnega pola
- Kartezične koordinate – enotska krožnica:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{RA} = \begin{bmatrix} \cos \delta \cos \alpha \\ \cos \delta \sin \alpha \\ \sin \delta \end{bmatrix}$$



TRANSFORMACIJA: ČASOVNI KOT - REKTASCENZIJA

- Povezava med obema sistemoma je podana preko astronomske dolžine opazovališča Λ in časa t :
- Transformacija iz sistema rektascenzije v sistem časovnega kota

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{HA} = P_2 R_z(LST) \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{RA}$$

1. uskladimo X osi obeh sistemov ($R_z(LST)$)
 - LST predstavlja lokalni zvezdni čas opazovališča (vsota $h + \alpha$)
2. spremenimo sučnost sistema (P_2)

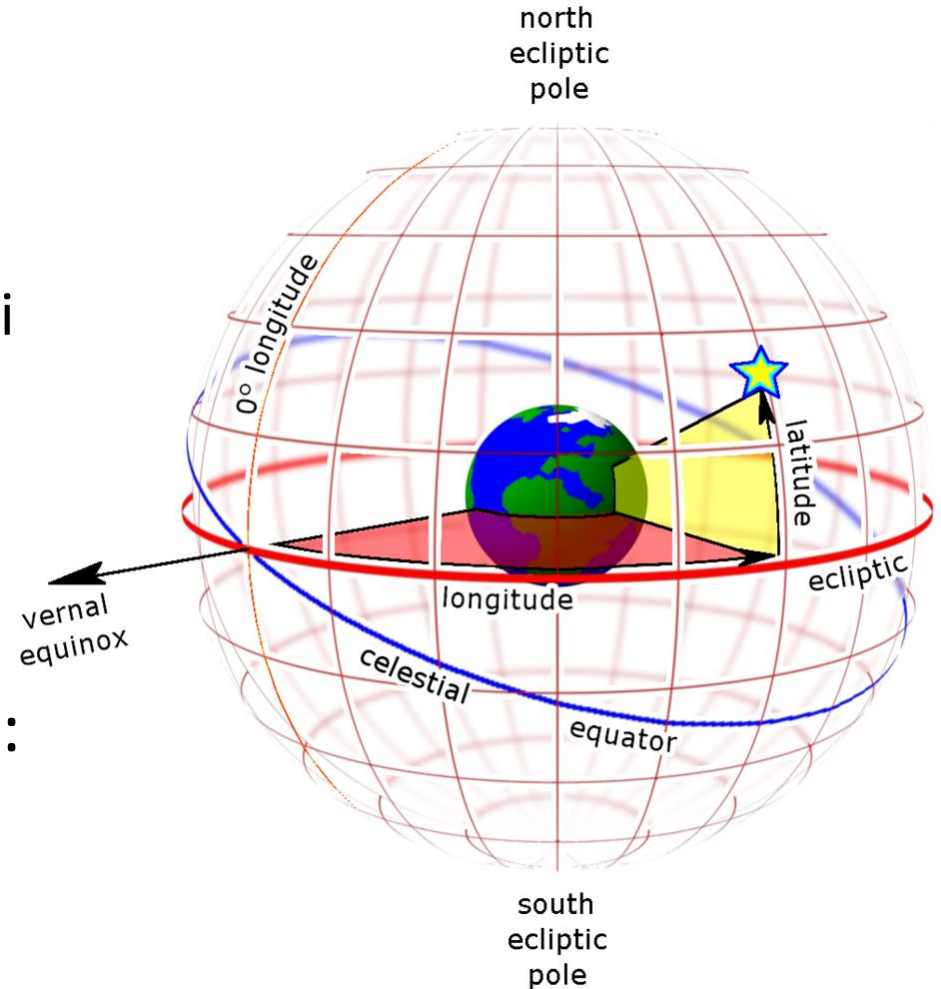
EKLIPTIČNI NEBESNI SISTEM

- Osnovna ravnina: ravnina ekliptike
- Osnovna Z os: severni ekliptični pol
- Sekundarna X os: pomladišče
- Terciarna Y os: **desnosučen** sistem
- Izhodišče: lahko težišče Zemlje, tudi težišče osončja
- Pričvrščen na nebesna telesa
- Inercialni sistem – nepremičen glede na nebesna telesa

EKLIPTIČNI NEBESNI SISTEM

- Sferni koordinati:
 - ekliptična širina β – kot med ekliptičnim ekvatorjem in smerjo (izhodišča) proti zvezdi
 - ekliptična dolžina λ - kot v ravnini ekliptičnega ekvatorja med pomladiščem in ekliptičnim meridianom zvezde, merjeno v nasprotni smeri urinega kazalca gledano iz S ekliptičnega pola
- Kartezične koordinate – enotska krožnica:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_E = \begin{bmatrix} \cos \beta \cos \lambda \\ \cos \beta \sin \lambda \\ \sin \beta \end{bmatrix}$$



TRANSFORMACIJA: EKLIPTIČNI SISTEM- EKVATORSKI (REKTASCENZIJA)

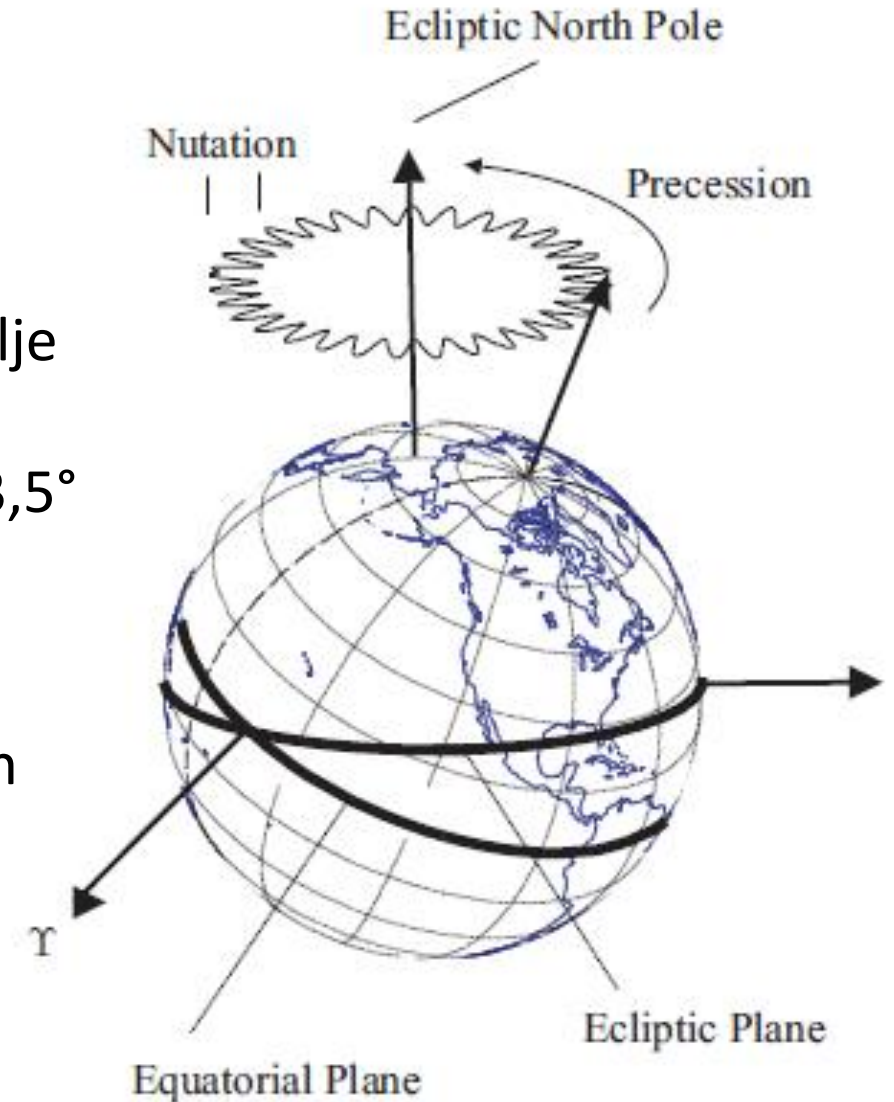
- Povezava med obema sistemoma je podana preko kota naklona nebesnega ekvatorja Zemlje glede na ekliptiko ϵ :
- Transformacija iz sistema rektascenzije v sistem časovnega kota

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{RA} = R_1(-\epsilon) \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_E$$

1. uskladimo Z osi obeh sistemov ($R_1(-\epsilon)$)

PRECESIJA IN NUTACIJA

- Lunisolarna precesija:
 - vpliv težnosti Sonca in Lune na „izboklino“ Zemlje zaradi sploščenosti
 - „opletanje“ rotacijske osi Zemlje z naklonom $23,5^\circ$
 - perioda 25 800 let (premik $50.3''$ /leto)
- Nutacija:
 - vpliv inklinacije orbite Lune glede na ekliptiko in njene eliptičnosti
 - perioda od 5 dni do 18,6 let
 - največja amplituda $\sim 9,5''$



PRECESIJA IN NUTACIJA

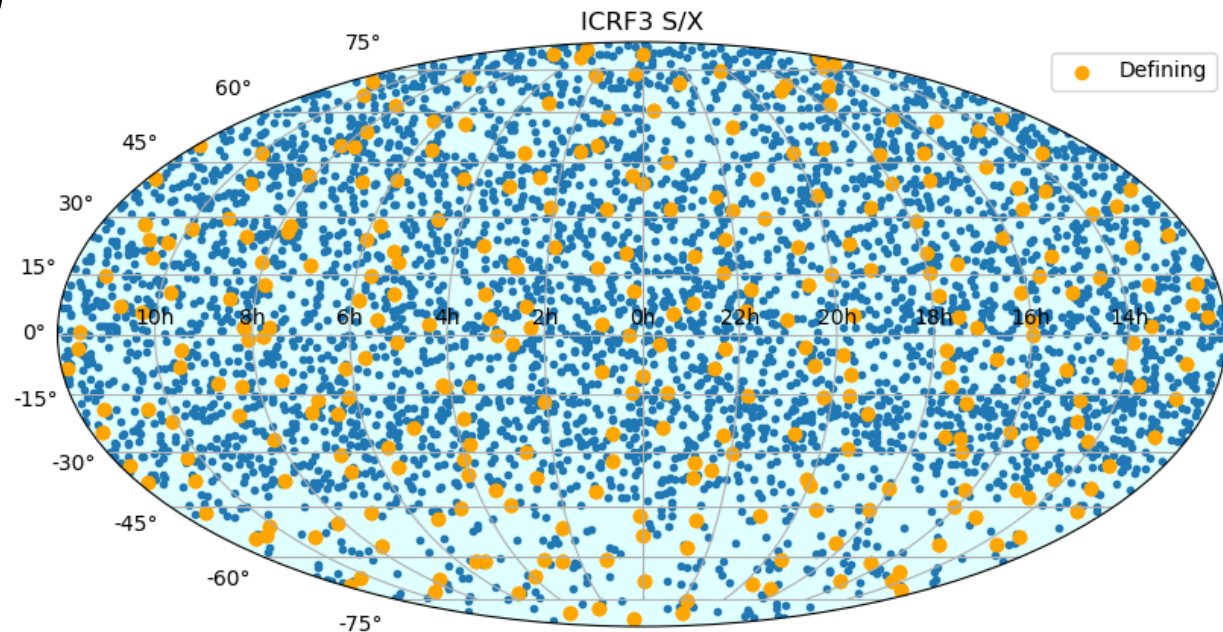
- Neupoštevanje precesije in nutacije
 - Pravi/trenutni položaj rotacijske osi v epohi t
- Upoštevanje nutacije
 - srednji položaj rotacijske osi v epohi t
 - srednji nebesni ekvator
 - srednje pomladišče
- Upoštevanje precesije
 - srednji položaj rotacijske osi (nebesnega ekvatorja) v referenčni epohi J2000
- J2000:
 - srednja rotacijska os in nebesni ekvator za epoho 1. 1. 2000 ob 12:00

ICRS – INTERNATIONAL CELESTIAL REFERENCE SYSTEM

- nebesni koordinatni sistem, ki ga je vzpostavila in ga vzdržuje IERS
- temelji na ekvatorskem nebesnem sistemu rektascenzije
- naslednik FK5 (nem. fundamental katalog 5 – katalog efemerid nebesnih teles)
- Definicija:
 - izhodišče: težišče sončnega sistema
 - primarna Z os: rotacijska os v epohi J2000
 - sekundarna X os: smer pomladišča za epoho J2000
 - terciarna Y os: desnosučnost
- realizacija: ICRF
- kakovost: nekaj mikro sekund (nivo pod mm na površju Zemlje)

ICRF – INTERNATIONAL CELESTIAL REFERENCE FRAME

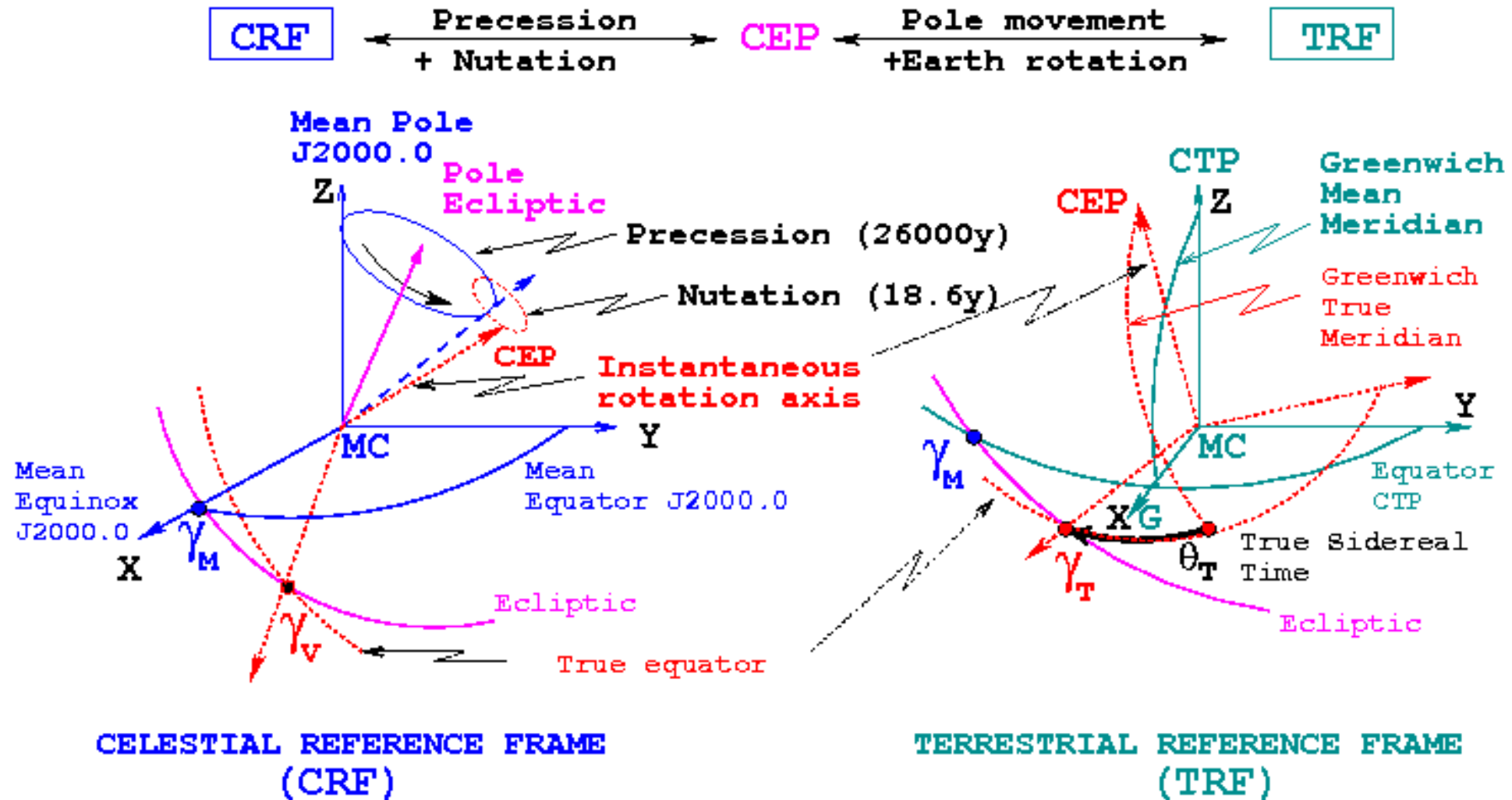
- Ekvatorialne koordinate 4536 kvazarjev v J2000, določenih z VLBI
- Natančnost: nivo pod *mas* (na površju Zemlje na nivoju mm – cm)
- 3. realizacija: ICRF3 (<https://www.iers.org/IERS/EN/DataProducts/ICRF/ICRF3/icrf3.html> in <https://hpiers.obspm.fr/icrs-pc/>)



TRANSFORMACIJA MED ITRS IN GCRS

- ITRS – International Terrestrial Reference System
- GCRS – Geocentric Celestial Reference System
- Sistema imata enako izhodišče
- razlikujeta se v orientaciji osi:
 - ITRS je pričvrščen na Zemljo in z njo rotira
 - GCRS je pričvrščen na Zemljo, ne rotira z njo in nima enako orientiranih osi
- Transformacija je dana preko:
 - standardnih modelov precesije, nutacije in rotacije Zemlje
 - parametrov rotacije Zemlje (angl. EOP Earth Orientation Parameters), zagotavlja jih IERS:
 - čas UT1 in „presežek“ LOD (angl. Length of day)
 - Koordinate pola: x in y vrednosti odstopanja pola od položaja „IERS Reference Pole“
 - Časovne variacije precesije in nutacije

TRANSFORMACIJA MED ITRS IN GCRS



TRANSFORMACIJA MED ITRS IN GCRS

- Enačba transformacije (iz nebesnega v terestrični sistem):

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{ITRS} = R_{PM} R_Z(\theta) R_{NPB} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{ICRS}$$

- rotacijske (transformacijske) matrike:
 - R_{NPB} - modelira precesijo (**P**), nutacijo (**N**) in odstopanja pola in pomladišča od J2000 (angl. frame **B**ias)
 - $R_Z(\theta)$ - modelira rotacijo Zemlje
 - R_{PM} - modelira gibanje polov
- Analitični del – ni potrebe po dodatnih podatkih: precesija, nutacija
- Spremenljivi del: gibanje polov in sprememba rotacije (IERS služba)
- Spletna aplikacija izračuna celotno rotacijsko matriko prehoda iz ITRF v ICRF:
 - <https://hpiers.obspm.fr/eop-pc/index.php?index=rotation&lang=en>

VIRI:

- Jekeli, C., 2016: Geometric Reference Systems in Geodesy ([https://kb.osu.edu/bitstream/handle/1811/77986/Geom Ref Sys Geodesy 2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://kb.osu.edu/bitstream/handle/1811/77986/Geom_Ref_Sys_Geodesy_2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y))
- Krakiwsky, E.J., Wells, D.E., 1971: Coordinate systems in geodesy (<http://www2.unb.ca/gge/Pubs/LN16.pdf>)
- Rummel, R., Peters, T., 2001: Reference Systems in Satellite Geodesy (<http://mediatum.ub.tum.de/doc/1367021/714162.pdf>)
- Torge, W., 2001: Geodesy, de Gruyter, Berlin, New York
- Seeber, G., 2003: Satellite Geodesy, de Gruyter, Berlin, New York
- Petit, G., Luzum, B., 2010: IERS Conventions 2010 (https://www.iers.org/SharedDocs/Publikationen/EN/IERS/Publications/tn/TechnNote36/tn36.pdf?__blob=publicationFile&v=1)
- ESA:
 - [https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Transformation between Celestial and Terrestrial Frames](https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Transformation_between_Celestial_and_Terrestrial_Frames)
 - [https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Transforming Celestial to Terrestrial Frames](https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Transforming_Celestial_to_Terrestrial_Frames)
- SOFA program: <https://iausofa.org/>
- IERS spletna stran: https://www.iers.org/IERS/EN/Home/home_node.html
- Pretvorba ITRF > ICRF: <https://hpiers.obspm.fr/eop-pc/index.php?index=rotation&lang=en>