

# Astronomska precesija

---

**Kunac, Marin**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2019**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Split, Faculty of Maritime Studies / Sveučilište u Splitu, Pomorski fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:164:772092>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-23**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository - Faculty of Maritime Studies - Split -  
Repository - Faculty of Maritime Studies Split for  
permanent storage and preservation of digital  
resources of the institution](#)



**SVEUČILIŠTE U SPLITU  
POMORSKI FAKULTET U SPLITU**

**MARIN KUNAC**

**ASTRONOMSKA PRECESIJA**

**ZAVRŠNI RAD**

**SPLIT, 2019.**

**SVEUČILIŠTE U SPLITU  
POMORSKI FAKULTET U SPLITU**

**STUDIJ: POMORSKA NAUTIKA**

# **ASTRONOMSKA PRECESIJA**

**ZAVRŠNI RAD**

**MENTOR:**

**izv. prof. dr. sc. ZVONIMIR LUŠIĆ**

**STUDENT:**

**MARIN KUNAC**

**(MB:01712735120)**

**SPLIT, 2019.**

## SAŽETAK

Danas su brodovi opremljeni suvremenom elektroničkom opremom za efikasnu navigaciju, međutim određivanje pozicije broda osmatrajući nebeska tijela još uvijek je neophodna i jedna od bitnijih vještina svakog nautičara. Dakako, ona pretpostavlja i poznavanje astronomskih pojava koje uzrokuju promjene koordinata nebeskih tijela, kao što su refrakcije, aberacije, paralakse, precesije i nutacije. U ovom radu se usmjerilo na ove posljednje dvije, s ciljem da se naglasi važnost astronomske precesije i nutacije za određivanje koordinata nebeskih tijela, koje su temelj astronomske navigacije. U radu je detaljno objašnjeno što je astronomska precesija i nutacija, što ih uzrokuje i koja je uloga ovih pojava za prividno kretanje zvijezda na nebeskoj sferi. Naposljetku, iako navedene pojave neznatno utječu na promjenu koordinata, gledano u dužim vremenskim periodima (od nekoliko desetljeća i više) te promjene koordinata nisu zanemarive i bitan su čimbenik razumjevanja prividnog kretanja nebeskih tijela.

**Ključne riječi:** *astronomska precesija, astronomska nutacija, žiro, nebeska sfera*

## ABSTRACT

Modern ships are equipped with state of art electrical devices for efficient navigation, but the use of astronomical navigation to determine ship's position is still one of the most important skills of seafarers. In order to use astronomical navigation one must be familiar with astronomy, celestial objects and physical phenomena. This thesis is focused on astronomical nutation and precession, and their importance in the process of determining celestial objects coordinates. Coordinates are the bedrock upon which astronomical navigation lies. In this thesis astronomical nutation and precession are thoroughly explained. Furthermore this thesis explains what causes those processes and what is their role in the perceived movement of objects on celestial sphere. Although these processes do not have a large impact on coordinates, over longer time periods (several

decades) they do effect them and therefore they are important factor which can not be ignored.

**Keywords:** *astronomical precession, astronomical nutation, gyro, celestial sphere*

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD</b> .....	<b>1</b>
<b>2. POJAM PRECESIJE</b> .....	<b>2</b>
2.1 SLOBODNI ZVRK.....	3
2.2 PRECESIJA ZVRKA.....	3
<b>3. PRECESIJA KROZ POVIJEST</b> .....	<b>7</b>
3.1 ANTIČKI VIJEK.....	7
3.2 STARI VIJEK .....	9
3.3 STARA GRČKA – HIPARH (ARMILARNA SFERA I ASTROLAB) .....	10
3.4 SREDNJI VIJEK .....	12
<b>4. ASTRONOMSKA PRECESIJA</b> .....	<b>14</b>
4.1 UTJECAJ PRECESIJE NA KOORDINATE ZVIJEZDA.....	16
4.2 UTJECAJ PRECESIJE NA NAVIGACIJU .....	19
<b>5. ASTRONOMSKA NUTACIJA</b> .....	<b>24</b>
<b>6. UTJECAJ ASTRONOMSKE PRECESIJE NA KLIMATSKE PROMJENE</b> .....	<b>27</b>
6.1 MILANKOVIĆEVA TEORIJA KLIMATSKIH PROMJENA.....	27
6.1.1. Ekscentričnost orbite .....	28
6.1.2. Promjena nagiba Zemljine osi .....	29
6.1.3. Zajedničko djelovanje ciklusa .....	30
<b>7. ZAKLJUČAK</b> .....	<b>31</b>
<b>LITERATURA</b> .....	<b>32</b>
<b>POPIS SLIKA</b> .....	<b>34</b>

# 1. UVOD

Činjenica je kako se zvijezde i planeti ne nalaze uvijek na istom mjestu na nebeskom svodu već se prividno pomiču. Do toga dolazi između ostalog zbog astronomske precesije i nutacije. Tako na primjer, zbog precesije zvjezdana i tropska godina nisu jednake (tropska je kraća 20 minuta), a koordinate ekvatorskoga koordinatnoga sustava se mijenjaju. Naime, zbog oblika Zemlje (spljoštena odnosno elipsoid, nije kugla) i kosog položaja polarne osi Zemlje (prema ekliptici) s jedne strane i gravitacijskog utjecaja Sunca, Mjeseca i planeta, os rotacije zemlje je nagnuta prema ekliptici opisujući stožac oko ekliptičke osi. Ovakva rotacija Zemlje dovodi do sporih promjena nagiba ekvatora prema ekliptici i naziva se precesija, a analogna je precesiji zarotiranog zvrka (dok se vrti konstantnom brzinom). Zbog promjena relativnih položaja i udaljenosti Mjeseca i Sunca (u manjoj mjeri i planeta) dolazi do periodičnog remećenja Zemljina precesijskog stošca i to prvenstveno zbog utjecaja Mjeseca. Sunce je uvijek u ravnini ekliptike, a Mjesečeva staza prema njoj nagnuta otprilike za  $5^\circ$ , što uzrokuje da sjeverni nebeski pol ne opisuje kružnu putanju već blago sinusoidalnu s periodom od 18 godina što se naziva nutacija.

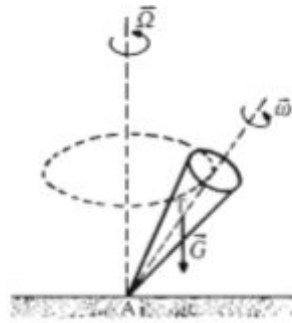
Upravo je astronomska precesija, uz nutaciju glavna tema ovog završnog rada i obrađena je kroz sedam poglavlja. Prvo poglavlje čini kratak uvod u temu i sam završni rad, a sedmo poglavlje je zaključak koji je ustvari sinteza cijelog rada. Unutar pet preostalih poglavlja, koja se nalaze između poglavlja *Uvod* i *Zaključak* se izravno obrađuje tematika ovoga rada, te ona čine glavni dio rada.

Drugo poglavlje govori o fizikalnim zakonitostima gibanja, a koji su u osnovi precesije. Objašnjenja su opisana na primjeru rotirajućeg zvrka kako bi se lakše shvatila Zemljina precesija koja je matematički analogna precesiji zvrka. Slijedeće, treće poglavlje uključuje povijesni osvrt na spoznavanje i objašnjavanje precesije i njenog utjecaja na gibanje zvijezda u odnosu na Zemlju. U četvrtom poglavlju dano je znanstveno objašnjenje astronomske precesije, te utjecaj precesije na koordinate zvijezda i navigaciju. U petom poglavlju objašnjavaju se mala, ali značajna kretanja Zemlje zbog kojeg okretanje Zemljine polarne osi nije uvijek isto - nutacija. Te naposljetku, u šestom poglavlju analizira se dugoročni utjecaj astronomske precesije na klimu planete Zemlje.

## 2. POJAM PRECESIJE

“Precesija na latinskom znači prednjačenje, a u fizici općenito znači gibanje koje izvodi rotirajuće tijelo zbog djelovanja sile koja nastoji promijeniti smjer osi vrtnje tijela u prostoru.” [3].

Najbolji primjer rotirajućeg tijela jest zvrk, a zvrk je rotaciono simetrično tijelo koje se vrlo brzo vrti oko svoje osi simetrije, pri čemu je stalno učvršćeno u jednoj točki koja leži na toj osi (slika 1).” [5]



Slika 1. Zvrk [5]

Na gibanje zvrka utječu momenti vanjskih sila. Tako primjerice utječe moment sile teže

$$\vec{M}_A = \vec{r}_A \times m \cdot \vec{g} = \vec{r}_A \times \vec{G} \quad (1)$$

pri čemu je:

$\vec{M}_A$  - moment sile,

$\vec{r}_A$  - radijus zvrka,

$m$  - masa zvrka,

$\vec{g}$  - gravitacijska akceleracija i

$\vec{G}$  - težina zvrka.

Iz toga proizlazi da se gibanje dijeli na dvije komponente: gibanje slobodnog zvrka ( $\vec{M}_A = \vec{0}$ ) i moment gibanja zvrka obzirom na točku nožišta osi rotacije A kada se razlikuje od nulvektora ( $\vec{0}$ ). Zadnje navedeno gibanje se naziva precesija zvrka. [5]



## 2.1 SLOBODNI ZVRK

Neka je zvrk učvršćen odnosno poduprt u svom težištu (slika 2). Ako je sila teža jedina vanjska sila koja djeluje na zvrk, tada je ukupni moment vanjskih sila jednak nuli

$$\sum \vec{M}_A = \vec{0}$$

te se kaže da je zvrk slobodan.



Slika 2. Slobodan zvrk [5]

Nadalje, gibanje zvrka opisuje se diferencijalnom jednadžbom:

$$\vec{M}_A = \frac{d\vec{L}_A}{dt} \quad (2)$$

pri čemu je:

$\vec{M}_A$  - rezultatni moment vanjskih sila s obzirom na točku u kojoj je zvrk učvršćen,

$d\vec{L}_A$  - diferencijal ukupnog momenta količine gibanja zvrka s obzirom na točku u kojoj je zvrk učvršćen i

$dt$  - diferencijal vremena.

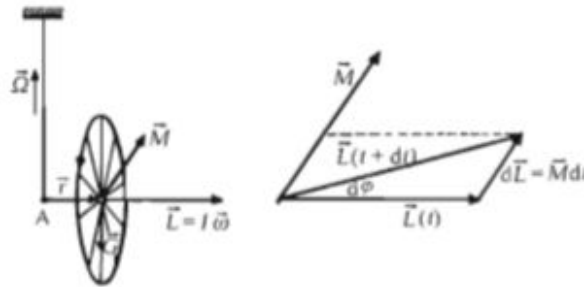
Os slobodnog zvrka zadržava stalan pravac u prostoru u odnosu prema inercijalnom referentnom sustavu, npr. koordinatnom sustavu prema zvijezdama. Pri rotaciji Zemlje oko njezine osi samo je Zemljina os nepomična, te slobodan zvrk ne mijenja os vrtnje s obzirom na sustav vezan za Zemlju samo onda kada se os vrtnje zvrka i Zemlje poklapaju.

## 2.2 PRECESIJA ZVRKA

Ukoliko je zvrk učvrćen u nekom drugom središtu A, a ne u svom težištu, na os zvrka će konstantno djelovati moment sile teže, te će zvrk obavljati kretanje koje se zove precesija. Precesiju zvrka se može vidjeti na slijedećem primjeru: kotač bicikla s

produženom osovinom se zavrti kutnom brzinom  $\vec{\omega}$ , te objesi na konop tako da osovina zvrka bude vodoravna (slika 3). Kada se kotač na konopcu pusti da se sam rotira, on neće past, unatoč utjecaju sile teže, zbog toga što kotač vrši precesiju. Os zvrka se rotira, i ono nastavlja svoje kretanje po kružnici. Na zvrk djeluje moment sile koji nastaje zbog njegove težine  $\vec{G} = m \cdot \vec{g}$ .

$$\vec{M}_A = \vec{r}_A \times \vec{G} \quad (3)$$



Slika 3. Precesija zvrka [5]

Obzirom da je vektorski produkt vektorska veličina, moment sile, kao rezultat vektorskog umnoška je okomit na vektore  $\vec{r}_A$  i  $\vec{G}$ , odnosno na smjer sile  $\vec{G}$  i os rotacije. Duljina (iznos, modul) vektora momenta sile  $\vec{M}$  se računa po formuli modula vektorskog produkta:

$$|\vec{M}| = M = G \cdot r_A \cdot \sin \alpha \quad (4)$$

pri čemu je:

$M$  - iznos (modul) vektora momenta sile  $\vec{M}$ ,

$G$  - iznos (modul) vektora  $\vec{G}$ ,

$r_A$  - iznos (modul) vektora  $\vec{r}_A$  i

$\alpha$  - kut između vektora  $\vec{G}$  i  $\vec{r}_A$  te iznosi 90 stupnjeva.

U ovom modelu gibanja zvrka se može pretpostaviti da je moment količine gibanja zvrka  $\vec{L}_A$  (obzirom na točku A) u smjeru osi rotacije zvrka te da s njim polako precesira oko točke A. Ta pretpostavka je to opravdanija što se zvrk brže vrti oko svoje osi, Može se, dakle, pretpostaviti da približno vrijedi relacija

$$\vec{L}_A = I \cdot \vec{\omega}$$

pri čemu je:

$\vec{L}_A$  - moment količine gibanja zvrka,

$I$  – inercija zvrka i

$\vec{\omega}$  - kutna brzina.

Naime, u malom vremenskom intervalu  $dt$  moment količine gibanja  $\vec{L}_A$  promijenit će se za određeni  $d\vec{L}_A = \vec{M}dt$  i u trenutku  $t + dt$  bit će  $\vec{L}_A + d\vec{L}_A$  slika (3). Budući da je  $\vec{M}$  uvijek okomit na  $\vec{L}_A$  te se smjer od  $\vec{L}_A$  stalno se mijenja, a njegov iznos ostaje konstantan: vrh vektora  $\vec{L}_A$ , dakle, opisuje kružnicu, odnosno zvrk precesira. Navedeno je analogija kružnom gibanju u kojemu je vektor sile  $\vec{F}$  okomit na vektor količinu gibanja  $\vec{p}$ .

Os zvrka (kao i vektor momenta količine gibanja koji koindicira s osi) u vremenu  $dt$  opiše kut  $d\varphi$ , te je kutna brzina precesije:

$$\Omega = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\varphi(t + \Delta t) - \varphi(t)}{\Delta t} = \frac{d\varphi}{dt} = \frac{|d\vec{L}|}{Ldt} = \frac{Mdt}{Ldt} = \frac{M}{L} \quad (5)$$

pri čemu je:

$\Omega$  - iznos kutne brzine,

$\frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$  - diferencijalni kvocijent,

$L$  - iznos momenta količine gibanja zvrka i

$M$  - iznos (modul) vektora momenta sile  $\vec{M}$ .

Budući da je vektor  $\vec{M}$  međusobno okomit na vektore  $\vec{L}$  i  $\vec{\Omega}$  formulu za kutnu brzinu precesije može se napisati u obliku vektorskog produkta:

$$\vec{M} = \vec{\Omega} \times \vec{L} \quad (6)$$

Uzevši u obzir da je  $L_Z = I_Z\omega$ , kutna brzina precesije izračunava se u ovisnosti o kutu između  $\vec{\Omega}$  i  $\vec{L}$ :

$$M = \Omega \cdot L \cdot \sin \alpha \quad (7)$$

Odnosno:

$$\Omega = \frac{M}{L \cdot \sin \alpha} = \frac{m \cdot g \cdot r \sin \alpha}{L \cdot \sin \alpha} = \frac{m \cdot g \cdot r}{L} \quad (8)$$

dakle isto kao i u primjeru na slici 3.

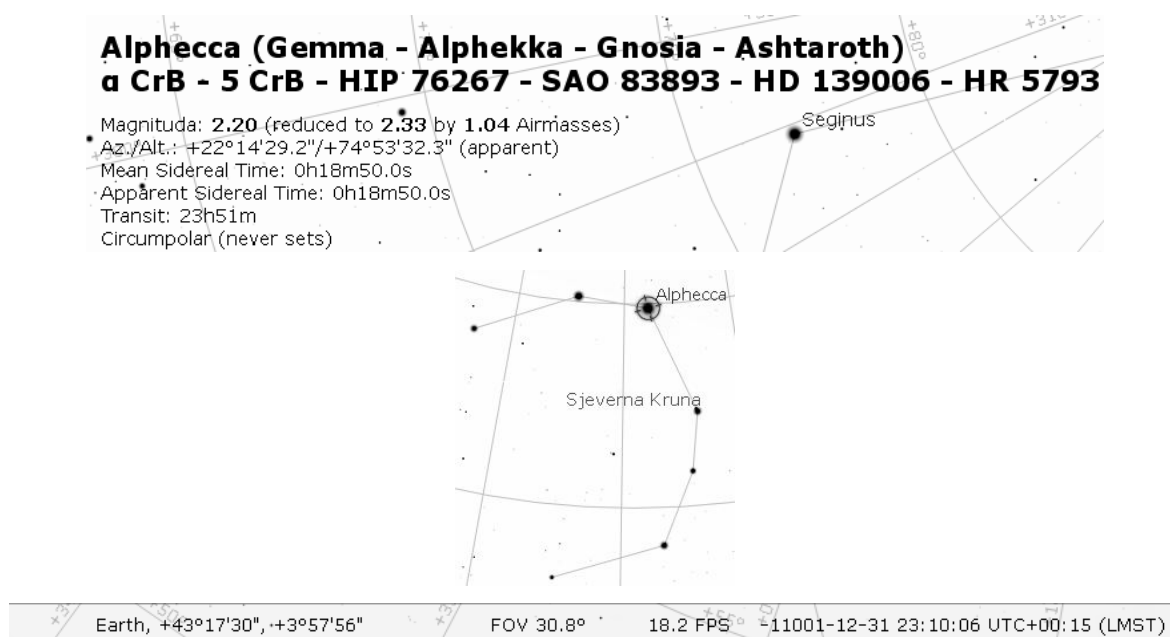
Kutna brzina precesije upravno je razmjerna momentu sile, a obrnuto razmjerna momentu tromosti i kutnoj brzini zvrka. Kad je  $\omega$  velika, tada je kutna brzina precesije  $\Omega$  malena. Kako se s vremenom (zbog trenja)  $\omega$  smanjuje,  $\Omega$  se povećava.

Zvrčni kompas se pod utjecajem Zemljine rotacije svojom osovinom postavlja u smjer meridijana. Posljedično, uređaji žirohorizont i žirovertikala temelje se na gibanju zvrka i služe za mjerenje odstupanja od pravca leta aviona, raketa i slično. Principi na kojima se temelje konstrukcije tih instrumenata vrlo su različiti, ali se koriste svojstvima zvrka razmotrenima u ovom poglavlju. [5]

### 3. PRECESIJA KROZ POVIJEST

#### 3.1 ANTIČKI VIJEK

Jedan od najstarijih primjera slika zvijezda nalazi se u špilji Cueva di el Castillo u Kantabriji (Slika 5). Prikazano je u obliku sedam točkica poredanih u obliku pravilnog polukruga npr. treća točkica zdesna je najveća, a odgovarala bi najsvjetlijoj zvijezdi konstelacije Alphekki. Smatra se da predstavlja zvijezde Sjeverna Kruna (Corona Borealis). Zbog precesije odnos se zvijezda unutar konstelacije mijenjao pa slika može predočavati ovo zvijezde samo u razdoblju 13.000. – 7.000. godine pr. Krista, što se slaže s datumima dobivenim metodom analize C-14. Zanimljivo da i zvijezda koja spominje Homer, a i kasniji autori, redovito imaju po sedam zvijezda: Veliki i Mali medvjed, Orion, Boötes, Plejade, Hijade...). Rappenglück je izračunao u kojem je razdoblju zvijezde Corona Borealis moglo imati neko posebno značenje zbog kojega bi ga paleolitički ljudi imali razlog promatrati. Tako je izračunao da je konstelacija bila cirkumpolarna od oko 11.000. godine pr. Krista, gledano s zemljopisne širine Cueve di el Castillo (Slika 4). Prije toga datuma sve zvijezde nisu bile vidljive iznad horizonta u trenutku donje kulminacije ovoga zvijezda. Zatim, izračunao je da je konstelacija najbliže polu ( $17^\circ - 21^\circ$ ) bila u razdoblju između 8.000. i 7.500. godine pr. Krista i tada je mogla najbolje poslužiti kao pokazatelj sjevernog nebeskog pola.



Slika 4. Prikaz Sjeverne Krune 11.000 g.p.n.e



**Slika 5. Sjeverna Kruna iz špilje Cueva de el Castillo 11.000 g.p.n.e [13]**



**Slika 6. Sjeverna Kruna danas**

U posljednje vrijeme neki američki arheolozi postavili su odvažnu tezu po kojoj su najraniji naseljenici u Ameriku došli iz Europe u razdoblju gornjopaleolitičke kulture solutrena. Oni su pronašli veliku sličnost između tehnologije izrade oruđa u toj gornjopaleolitičkoj kulturi (oko 22.000.-16.500. pr. Krista) i izrade oruđa u Clovis-kulturi (početak oko 12.000 pr. Krista) na američkom kontinentu. U istočnoj Aziji, otkuda su navodno došli nositelji Clovis-kulture, nema slične tehnologije, a solutrenska litička privreda mnogo je sličnija Clovis-privredi nego litičkim privredama europskog kontinenta koje su joj prethodile ili su je nasljeđivale. Nositelji solutrenske tehnologije izrade oruđa živjeli su u vrijeme posljednjega glacijalnog maksimuma (oko 18.000 pr. Krista) u jugozapadnoj Francuskoj i sjevernoj Španjolskoj, te su se obilno koristili morem kao izvorom hrane. Stanford i Bradley smatraju kako su solutrenski pomorci mogli putovati uz ledene površine sjevernog Atlantika (morska je razina tada bila oko 130 m niža od današnje), a Rappenglück dodaje da su se za pomorsku navigaciju možda služili i

zviježdem Sjeverne krune. Tako bi prvim naseljenicima Amerike cirkumpolarno zviježđe Sjeverne krune poslužilo da pri navigaciji odrede Sjeverni nebeski pol i orijentiraju se prema sjeveru.

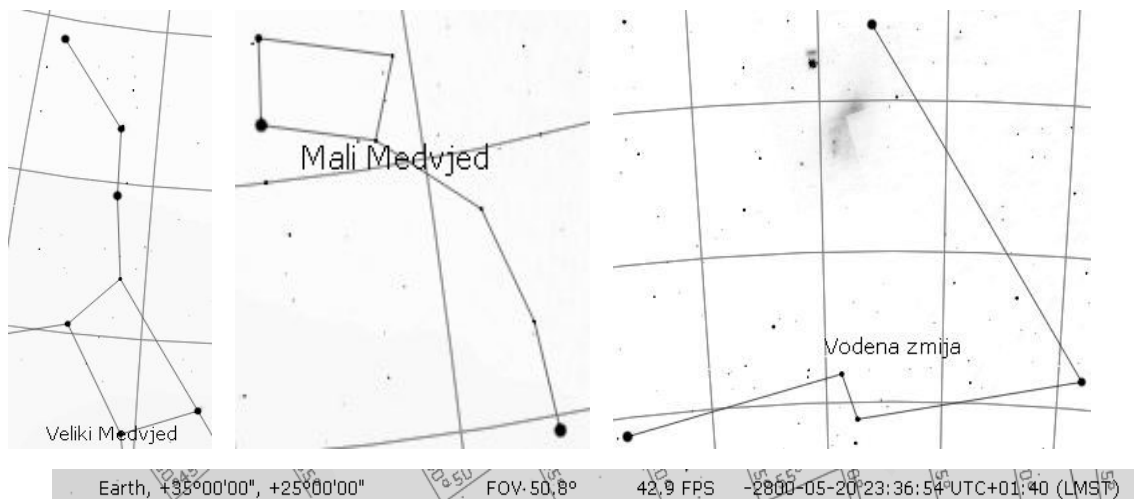
Ti su pomorci, također, mogli određivati i zemljopisnu širinu na temelju visine nebeskog pola iznad horizonta. Naime, zemljopisna širina s koje se promatra pol jednaka je visini samog pola iznad horizonta. Ova navigacijska metoda bila je česta u antici. S pomoću visine pola mogla se odrediti samo zemljopisna širina plovidbe. Za određivanje visine polarne zvijezde dovoljan je jednostavan štap s urezima. Svaki urez na štapu određuje visinu polarne zvijezde na određenoj lokaciji, npr. u nekoj luci. Navigator zna visinu polarne zvijezde (ili neke cirkumpolarne zvijezde u trenutku donje kulminacije) na svojem određištu i usmjeruje svoj brod sjeverno ili južno od kursa ovisno o visini te zvijezde. [1]

### 3.2 STARI VIJEK

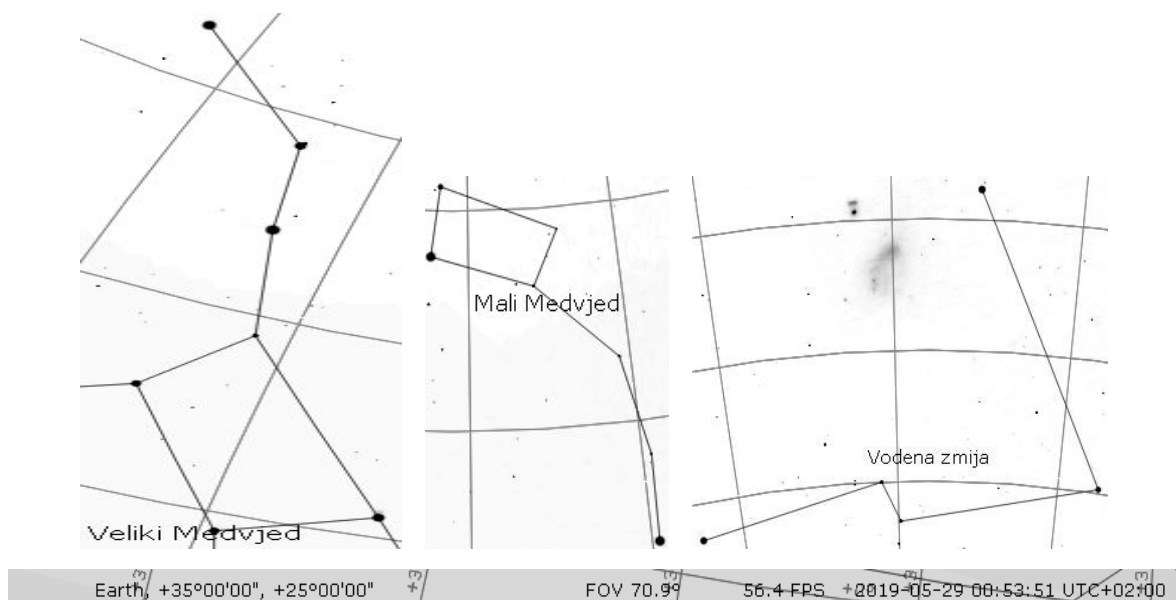
Najstariji zapisi o korištenju zvijezda u svrhu navigacije se opisuje u 8. stoljeću prije Krista u Homerovoj Odiseji. U Odiseji se koristi nekoliko zviježđa, a interesantno je da sva korištena zviježđa se sastoje od 7 zvijezda. Plejade u zviježđu Bika, zviježđe Velikog medvjeda koje je ujedno najistaknutije zviježđe na sjevernom nebu, a ono je u grčko doba bilo cirkumpolarno, te Orion, istaknuto zviježđe na južnom nebu.

John Rogers je imao teoriju koju je zapisao u ("Origin of Ancient Constellations II"), kako su se pojedina zviježđa na Mediteranu koristila u svrhu navigacije oko 2.800 godine prije Krista. Spomenuo je nekoliko zviježđa kao što su: zviježđe Velikog medvjeda, Malog medvjeda, te Hydra, koja je u tom razdoblju imala ulogu označavanja ekvatora danas zbog djelovanja precesije nije tako (slika 7). Također, koristila su se 4 pojedine zvijezde Hercules, Ophiuchus, Boötes i Auriga. Nadalje pomorci su u prošlosti koristili južna morska zviježđa (Pisces, Argo, Cetus, Orion, Eridanus, Centaurus).

Michael Ovenden je u djelu "The Origin of the Constellations" analizirao Aratove *Phaenomena*, te je zaključio da su u tom djelu opisana zviježđa korištena nastala oko  $2.600 \pm 800$  godina prije Krista na približno  $36^\circ$  sjeverne zemljopisne širine. Nastanak tih opisa je pripisao kretskim pomorcima koji su plovili u minojskom razdoblju. Samuel Borchart je zaključio kako su upravo ta zviježđa reprodukcija pramčanih figura na feničkim brodovima, ujedno bi se onda i objasnila nekompletnost nekih figura (Pegaza, Bika,...).



**Slika 7. Veliki Medvjed, Mali Medvjed i Vodena zmija 2.800 g.p.n.e**



**Slika 8. Veliki Medvjed, Mali Medvjed i Vodena zmija danas**

Koliko su povezane astronomija i navigacija u *Oceaniji*, svjedoči sljedeći navod: “U Mikroneziji, kako piše Goodenough, astronomija duguje svoj razvitak potrebama navigacije. Poznavanje zvijezda, njihovih imena i kretanja je uvelike ograničeno na profesionalne navigatore.” [2]

### 3.3 STARA GRČKA – HIPARH (ARMILARNA SFERA I ASTROLAB)

Hiparh je između 141. i 126. godine p.n.e. odredio duljinu tropske godine određujući vremenski interval između iste duljine sjene gnomona u vrijeme solsticija. Jednako tako je odredio i trajanje zvjezdane godine motrenjem trenutka izlaska i zalaska



Sunca prema svjetlijim zvijezdama (helijački izlazak i zalazak). Usporedbom trajanja tih dviju godina našao je da je tropska godina oko 20 minuta kraća od zvjezdane. Zaključio je kako je upravo to razlog zbog koje se proljetna točka kreće retrogradno oko 50'' u godini. U to ga je uvjerila i razlika u ekliptičkim koordinatama 850 zvijezda koje je on odredio jednim starim astronomskim instrumentom (armilarna sfera; vidjeti poglavlje 3.3.1.), s koordinatama koje su ustanovili Aristil i Timoharis približno 150 godina prije njega. Ekliptičke širine su prije njega bile iste, dok su se ekliptičke duljine povećavale, kao da se proljetna točka pomicala retrogradno oko 50'' godišnje a obzirom da proljetna točka prednjači u susret Suncu, ova je pojava dobila ime precesija. Tek je otkrićem Newtonova zakona gravitacije, ova pojava mogla biti mehanički protumačena. [3]. Dakle, Hiparh je izumio astrolab i armilarnu sferu koju je koristio tijekom izrade zvjezdanog kataloga te je prvi položaje na Zemlji određivao korištenjem geografskih širina i dužina. Posljedično je i utemeljio osnovne trigonometrijske principe i zakonitosti. Kuriozitet je da su po njemu nazvani krater na Mjesecu (Hipparchus) i planetoid (4.000 Hipparchus). [9]

*“Armilarna sfera (prema lat. armilla: narukvica, obruč), stara astronomska naprava za mjerenje koordinata nebeskih tijela i za poduku iz astronomije. Smatra se da ju je izumio Hiparh iz Nikeje. Sastavljena je od drvenih ili kovinskih prstenova koji, sa Zemljom u središtu, predočuju najvažnije kružnice ekvatorskoga koordinatnog sustava (npr. Nebeski ekvator i ekliptiku).” [7]*



**Slika 9. Armilarna sfera [7]**

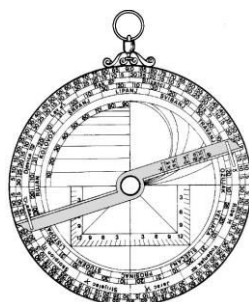
Astrolab je sprava koja je tijekom antike pa sve do doba renesanse služila kao instrument za mjerenje visine nebeskih tijela, kao pomagalo za grafičko rješavanje zadataka iz sferne astronomije (predviđanje položaja Sunca, Mjeseca, planeta i zvijezda bez računanja) i kao učilo u poduci iz astronomije. U početku je bio drven, grubo izrađen i velikog promjera, a upotrebljavao se samo na kopnu. U srednjem vijeku se izradio metalni

astrolab koji se mogao zbog svoje izvedbe koristiti i u svrhu navigacije. Poboljšana verzija armilarne sfere jest sferni astrolabe.



**Slika 10. Sferni astrolab [14]**

Plosnati astrolab (astrolabium planisphaerium) temelji se na stereografskoj projekciji nebeske kugle na ravninu. Astrolab s prizmom služio je za određivanje zemljopisnih koordinata stajališta. Danjonov bezlični astrolab služio je za vrlo točno određivanje vremena, zemljopisnih koordinata i položaja zvijezda u trenutku prolaska zvijezde okomitom kružnicom. [8]



**Slika 11. Plosnati Astrolab [8]**

### **3.4 SREDNJI VIJEK**

Jedna od metoda koja se koristila u plovidbama morima je bila orijentiranje po nebu odnosno orijentacija pomoću Sunca tijekom plovidbe danju, a zvijezda i Mjeseca noću. Prepoznatljiviji prividni skup zvijezda koji se ne ubrajaju u službena zvijezda se naziva asterizam. Asterizmi su bili najvažniji orijentiri pri plovidbi daleko od kopna. [2]

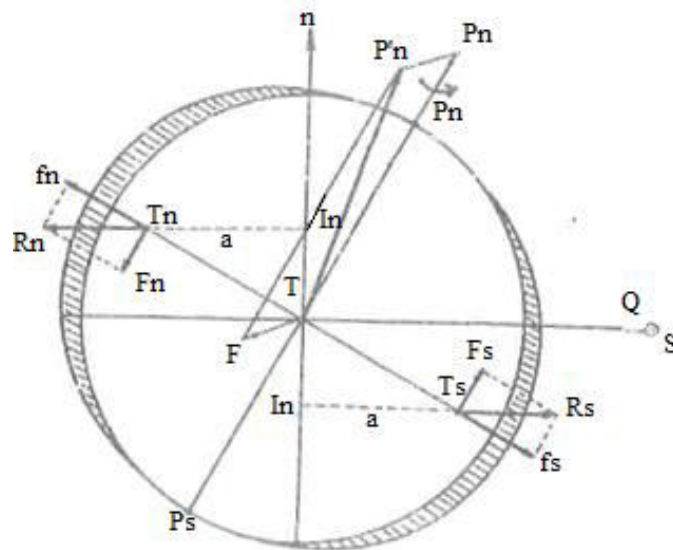
Naslijeđena saznanja iz antičkog razdoblja o njima bila su vrlo vrijedna, ali i prilično zagonetna srednjovjekovnim moreplovcima. Prateći prividno dnevno kretanje Sunca na nebu, u kulminaciji na jugu i odgovarajućim kombiniranjem vremena i iskustva,

pomorci su uvijek mogli procijeniti pravac sjever – jug. Gnomon je najstarija astronomska sprava za koju je bio dostatan okomiti štap čijom se sjenom određivala kulminacija Sunca u podne kada je sjena bila najkraća. Iz njega se izvodilo, dodavanjem kutne sprave, niz drugih podataka, čak i zemljopisna širina, odnosno mjesta na Zemlji s istom zemljopisnom širinom na kojima je sjena gnomona u određeni dan bila jednake dužine. Orijehtacija noću bila je posve drugačija. [6]

Zemljopisne širine za sve važnije luke su se znale po visinama pojedinih cirkumpolarnih zvijezda u njihovim donjim kulminacijama. Pomorci bi određivali svoju poziciju promatranjem i mjerenjem visine tih zvijezda kada se nalaze u položaju donje kulminacije. Međutim problem je nastao upravo zbog astronomske precesije jer te zvijezde se ne bih mogle upotrebljavati nakon nekog dužeg razdoblja. Podatak da je visina kulminacije pojedinih zvijezda jednaka ako se promatra s mjesta iste zemljopisne širine bio je iznimno značajan za noćnu orijentaciju pomoću zvijezda. Najčešće se mjerila visina Sunca i Polarne zvijezde te različitih asterizama, poput Malog i Velikog medvjeda, a vremenom i udaljenost između Mjeseca i Sunca, odnosno Mjeseca i određenih zvijezda. Za to je na kopnu služio astrolab dok su na moru njegovu primjenu otežavala nestabilna platforma, vjetrovi i valovi, no problem je otklonjen tek u 18. st., izumom sekstanta s dvostrukom refleksijom. [2]

#### 4. ASTRONOMSKA PRECESIJA

Planet Zemlja je rotirajuće tijelo kojem je os rotacije ujedno nebeska polarna os. Zemlja se ponaša kao zvrk kojem se os rotacije zbog inercije nastoji zadržati u istom položaju. Međutim, zbog spljoštenosti Zemlje i kosog položaja polarne osi prema ravnini ekliptike, gravitacijska sila Sunca i Mjeseca, te centrifugalne sile na Zemlji, nastoje polarnu os pomaknuti prema osi ekliptike. Po zakonima zvrka polarna os Zemlje se giba tako da opisuje plašt konusa oko pola ekliptike, i ta se pojava u astronomiji zove precesija. Tek je otkrićem Newtonova zakona gravitacije, ova pojava mogla biti mehanički protumačena. [3]



Slika 12. Oznake na Zemlji za astronomsku precesiju [3]

Zemlja je geoid slična elipsoidu, s ispupčenim dijelovima na ekvatoru. Da je ona homogena kugla, ne bi bilo precesije. Na Zemljino težište djeluje gravitacijska i centrifugalna sila, koje su u ravnoteži:

$$R_s = f \cdot \frac{M \cdot m}{(r - a)^2} - m \cdot \omega^2 (d - a) \quad (9)$$

pri čemu je:

$R_s$  - Rezultantna sila

$M$  - masa Sunca

$m$  - masa Zemlje

$r$  – udaljenost između Sunca i Zemlje

$f$  - gravitacijska konstanta

$d$  - udaljenost Zemljina težišta od težišta sustava Sunce – Zemlja

$a$  - udaljenost težišta od osi ekliptike  $a$ ,

$w$  - kutna brzina Zemlje.

Tada se za sile koje djeluju na težišta  $T_s$  i  $T_n$  može pisati:

$$R_n = f \cdot \frac{M \cdot m}{(r+a)^2} - m \cdot w^2 (d+a) \quad (10)$$

Pišu li se nazivnici u obliku:

$$\frac{1}{(r \pm a)^2} = \frac{1}{\left(r \left(1 \pm \frac{a}{r}\right)\right)^2} = \frac{1}{r^2 \left(1 \pm \frac{a}{r}\right)^2} = r^{-2} \left(1 \pm \frac{a}{r}\right)^{-2}$$

i razviju po binomnom poučku, onda zadržavši samo članove do drugog reda, prethodne relacije postaju:

$$R_s = f \cdot \frac{M \cdot m}{r^2} \left(1 + 2\frac{a}{r}\right) - m \cdot w^2 \cdot d + m \cdot w^2 \cdot a \quad (11)$$

$$R_n = f \cdot \frac{M \cdot m}{r^2} \left(1 - 2\frac{a}{r}\right) - m \cdot w^2 \cdot d - m \cdot w^2 \cdot a \quad (12)$$

ili

$$R_s = \left(f \cdot \frac{M \cdot m}{r^2} - m \cdot w^2 \cdot d\right) + \left(2f \cdot \frac{M \cdot m}{r^3} \cdot a + m \cdot w^2 \cdot a\right) \quad (13)$$

$$R_n = \left(f \cdot \frac{M \cdot m}{r^2} - m \cdot w^2 \cdot d\right) - \left(2f \cdot \frac{M \cdot m}{r^3} \cdot a + m \cdot w^2 \cdot a\right) \quad (14)$$

Relacije 13 i 14 pokazuju da na težište djeluju iste sile. U prvoj zagradi se gravitacijska i centrifugalna sila poništavaju, a druga zagrada pokazuje da na težišta djeluju dvije suprotne sile kojim su pravci paralelni s ravninom ekliptike zbog velike udaljenosti Sunca. Kad se te dvije sile rastave u komponente, onda se komponente  $f_s$  i  $f_n$  u ravnini ekvatora međusobno poništavaju, a ostaju dvije komponente paralelne s polarnom osi,  $f_s$  i  $f_n$ . One uzrokuju moment sile koji nastoji ravninu ekvatora dovesti u poklapanje s ravninom ekliptike, ili polarnu os s osi ekliptike.

Prikazan je način djelovanja Sunca, ali jednako djeluje i Mjesec, iako se on ne nalazi uvijek u ravnini ekliptike zbog nagiba njegove staze od  $5^{\circ}8,7'$ . Zbog toga se Mjesečev utjecaj mijenja i po intenzitetu. Po zakonima precesije osi zvrka, pol će se zakrenuti za  $90^{\circ}$  prema položaju koji pokazuje vektor  $TP'_n$  (slika 12). Zato će polarna os precesirati oko osi ekliptike, od koje će biti udaljena  $23^{\circ}26,5'$ . Posljedica toga bit će i klizanje ekvatora po eklipticim, tj. retrogradno gibanje proljetne točke, kao jedne od presječenih točaka ekvatora i ekliptike. Zajednički utjecaj Mjeseca i Sunca zove se luni-solarna precesija, i ona iznosi  $50,36''$  godišnje. Od toga je Mjesečev utjecaj  $34,48''$  jer je on bliži od Sunca, kojem pripada  $15,88''$ .

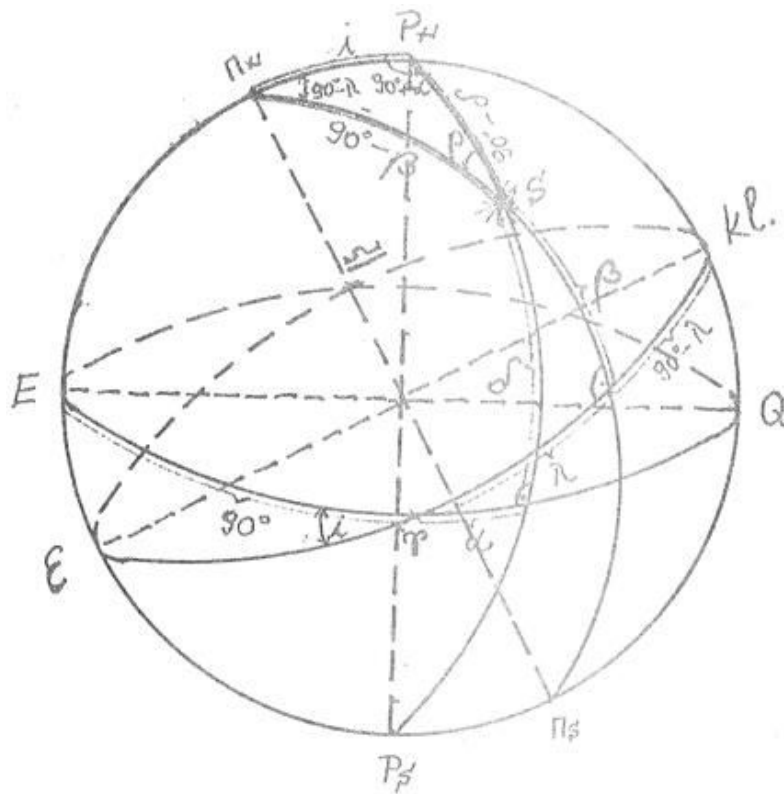
Zbog malog nagiba planetskih staza prema ravnini ekliptike, i planete malo utječu na gibanje polarne osi. Taj utjecaj zove se planetarna precesija i ona nastoji os ekliptike udaljiti od osi ekvatora, pa je ona progresivna i iznosi  $0,12''$ . Zbog planetarne precesije ekliptika se njiše oko svoga srednjeg položaja za  $\pm 4^{\circ}$  u razmaku od 60.000 godina, što izaziva fine promjene nagiba ekliptike. Sad nagib opada za  $0,468''$  godišnje.

Zajednički utjecaj luni-solarne i planetarne precesije zove se opća precesija i iznosi  $50,24''$ . [3]

#### **4.1 UTJECAJ PRECESIJE NA KOORDINATE ZVIJEZDA**

Luni-solarna i planetarna precesija povećavaju ekliptičku duljinu, a na širinu ne utječu dok planetarna precesija smanjuje rektascenziju, a ne djeluje na deklinaciju.

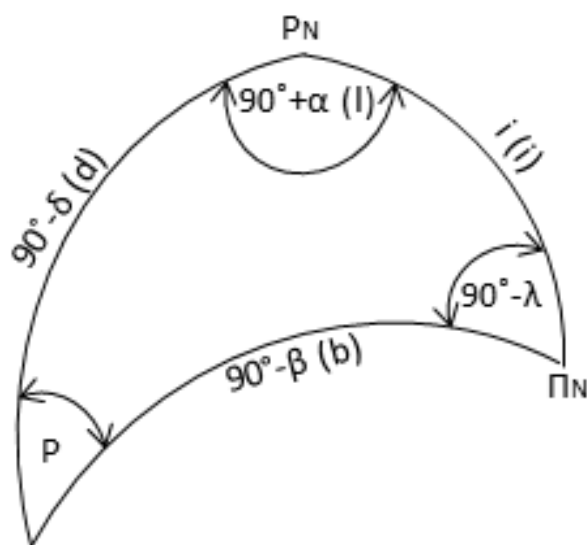
Da bismo izveli relaciju utjecaja precesije na nebesko-ekvatorske koordinate poslužit ćemo se kosinusovim poučkom za stranicu, sinusovim poučkom i sin-kosinusovim poučkom za stranicu i kut drugog astronomskog trokuta:



**Slika 13. Drugi astronomski trokut [3]**

Kombinacijom nebesko-ekvatorskog i ekliptičkoga koordinatnog sustava dobiva se drugi astronomski sferni trokut s vrhovima: nebeski pol (P), pol ekliptike ( $\Pi$ ) i nebesko tijelo (S).

Ravnina ekliptike nagnuta je prema ravnini ekvatora za kut  $i$ . Za tu istu veličinu udaljen je pol ekliptike od nebeskog pola, pa je to i jedna stranica ovog trokuta. Druge dvije stranice su komplementi deklinacije i latitude nebeskog tijela. Kut u nebeskom polu ( $90^\circ + \alpha$ ) jednak je odgovarajućem luku ekvatora, a kut u ekliptičkom polu ( $90^\circ - l$ ) jednak je odgovarajućem luku ekliptike. Kut u nebeskom tijelu ( $p$ ) zove se pozicijski kut.



**Slika 14. Izvedeni sferni trokut za proračun utjecaja precesije na koordinate nebeskih tijela**

Na slici 14. je nacrtan drugi astronomski trokut, a formule koje se dalje koriste u radu su izvedene iz ovoga trokuta.

$$\sin d = \sin b \cdot \cos i + \cos b \cdot \sin i \cdot \sin l \quad (15)$$

$$\cos d \cdot \cos \alpha = \cos b \cdot \cos l \quad (16)$$

$$\cos b \cdot \sin l = \sin d \cdot \sin i + \cos d \cdot \cos i \cdot \sin \alpha \quad (17)$$

Budući da su  $b$  i  $i$  konstante, diferencira se relacija (15) po varijablama  $d$  i  $l$  :

$$\cos d \Delta d = \cos b \cdot \sin i \cdot \cos l \Delta l \quad (18)$$

Iz relacije (16) izvuče se  $\cos d$  te se uvrsti u prethodnu:

$$\cos b \cdot \cos l \cdot \sec \alpha \Delta d = \cos b \cdot \cos l \cdot \sin l \Delta l \quad (19)$$

ili

$$\Delta d = \sin i \cdot \cos \alpha \Delta l \quad (20)$$

Relacija (20) daje izraz za promjenu deklinacije, a za promjenu rektascenzije diferencira se relacija (16):

$$\sin d \cdot \cos \alpha \Delta d + \cos d \cdot \sin \alpha \Delta \alpha = \cos b \cdot \sin l \Delta l \quad (21)$$

S pomoću relacija (20) i (16) to se može pisati:



$$\sin d \cdot \cos \alpha \cdot \sin i \cdot \cos \alpha \Delta l = (\sin d \cdot \sin i + \cos d \cdot \cos i \cdot \sin \alpha) \cdot \Delta \quad (22)$$

$$\cos d \cdot \sin \alpha \Delta \alpha = \cos d \cdot \sin \alpha \cdot \left( \cos i + \frac{\sin d \cdot \sin i}{\cos d} \cdot \sin \alpha \right) \cdot \Delta l \quad (23)$$

Budući da promjena ekliptičke duljine predstavlja luni-solarnu precesiju, tj.  $\Delta l = p'$  može se pisati:

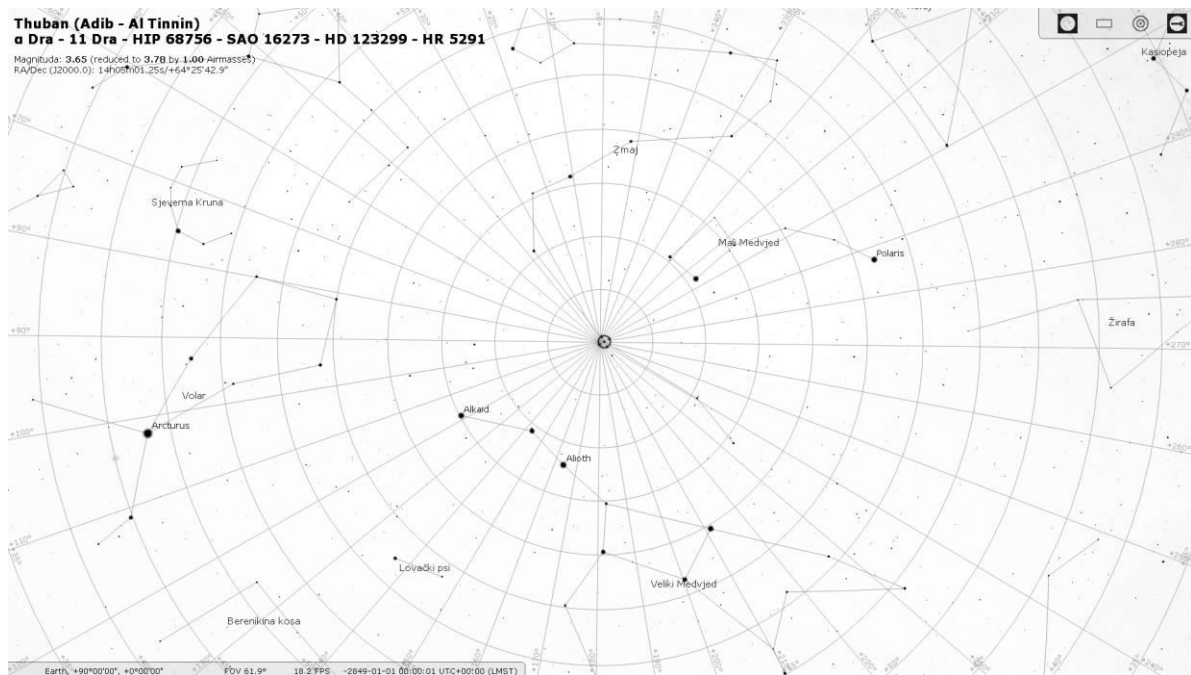
$$\Delta \alpha = p' \cos i - \Theta + p' \sin i \cdot \tan d \cdot \sin \alpha \quad (24)$$

jer je  $p = p' - \Theta \cos i$ . [3]

## 4.2 UTJECAJ PRECESIJE NA NAVIGACIJU

U astronomskoj navigaciji utjecaj precesije dolazi u obzir kod rada sa zvijezdama, npr. kad se koristi nautički godišnjak iz prethodne godine, ili kad se radi s avionskim tablicama za zvijezde koje su izračunate za jednu godinu kao epohu, a iste se koriste u drugim godinama. Uslijed precesije nebeska os se pomiče između zvijezda. Kada ona dođe u blizinu sjajnije zvijezde, onda izgleda da ta zvijezda prividno stoji, a da se zbog Zemljine rotacije sve druge okreću po koncentričnim kružnicama oko nje. To je tzv. Polarna zvijezda ili Polarnica, dobila je još ime i Sjevernjača.

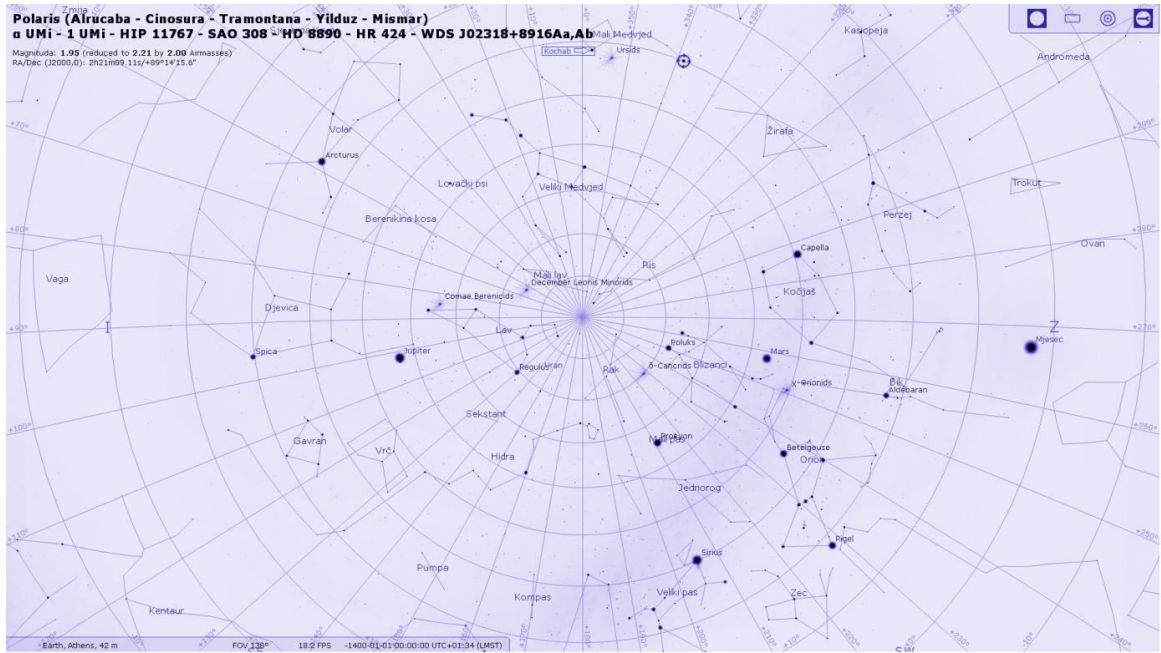
Godine 2.849. p.n.e. zabilježeno je da je najsjajnija zvijezda u zviježđu Zmaja po imenu Thuban ( $\alpha$  Draconis) imala ulogu polarne zvijezde, jer je bila  $2^\circ$  udaljena od pola, a oko 2.300. godine p.n.e. njezina udaljenost od pola je iznosila  $1/4^\circ$ .



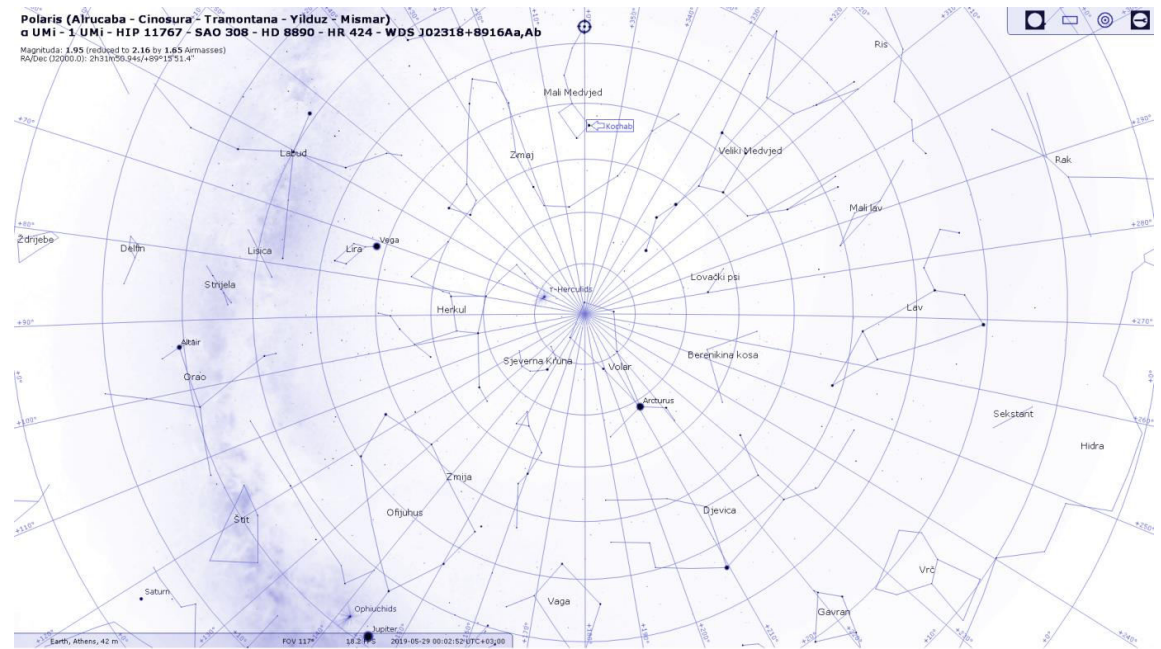
**Slika 15. Položaj zvijezde Thuban 2.849. g.p.n.e**

Homer u svom čuvenom spjevu Odiseji, u kojem vrijeme plovidbe stavlja u 15. stoljeću p.n.e., opisao kako je Odisej pravac sjevera grubo određivao prema zvijezdi Kochab u Malom medveju ( $\beta$  Ursa Minoris), koja je po današnjem računu bila  $7^\circ$  udaljena od sjevernog pola, a u 4. Stoljeću p.n.e.  $4^\circ$ .

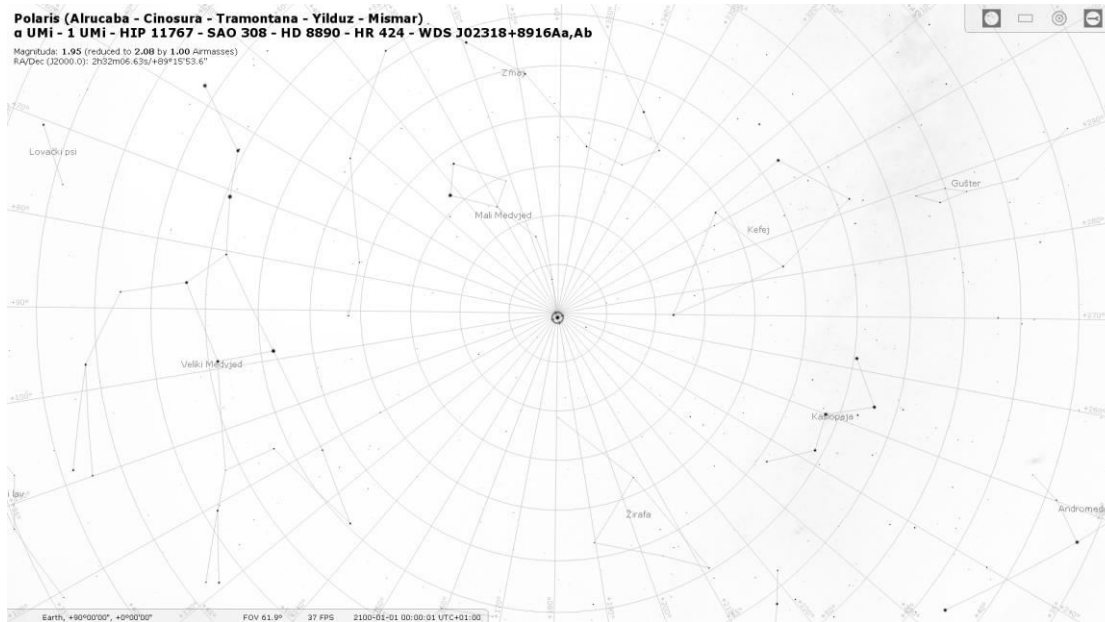
Današnja zvijezda Sjevernjača najsjajnija je zvijezda u zviježđu Malog medvjeda ( $\alpha$  Ursa Minoris). Ona je u doba Odiseje bila  $15^\circ$  od pola, u 15. stoljeću pol joj se približio na oko  $4^\circ$ , a danas na manje od  $1^\circ$ . Pol će joj se još približavati do oko 2.100. godine, kad će biti manje od  $1/2^\circ$  udaljen od nje, a onda će se početi polako udaljavati i za 12.000 godina neće biti ni jedne svijetle zvijezde u blizini pola. Tek oko 14.000. godine pol će se približiti najsjajnijoj zvijezdi sjevernog neba Vega ( $\alpha$  Lyre), ali joj se neće tako približiti kao sadašnjoj Sjevernjači. [3]



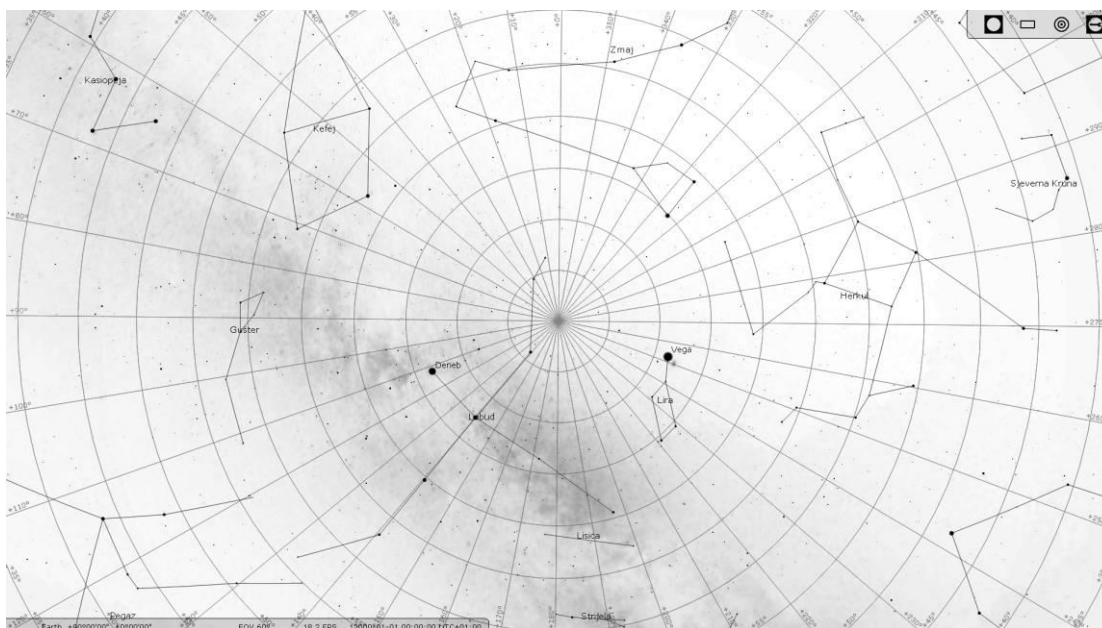
Slika 16. Položaj Polare i Kochab 15.st.p.n.e pogled iz Atene



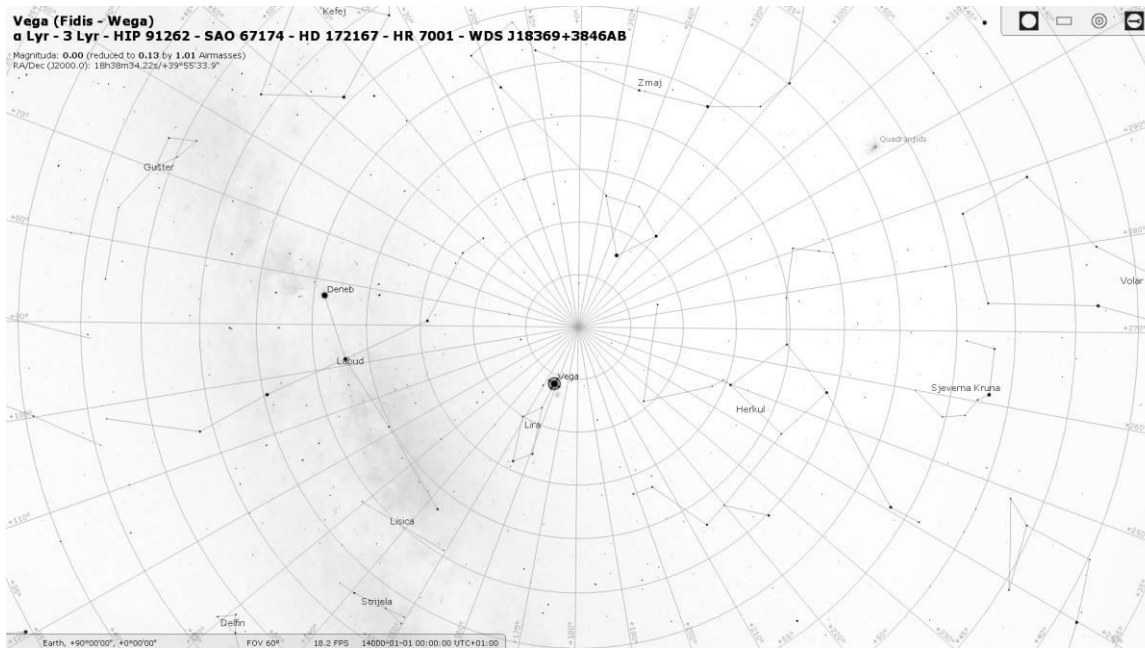
Slika 17. Položaj Polare i Kochab danas pogled iz Atene



**Slika 18. Položaj Polare 2.100. godine**



**Slika 19. Prikaz položaja zvijezda 12.000. godine (nedostatak sjeverne zvijezde)**



**Slika 20. Prikaz položaja zvijezde Vega kao sjeverne zvijezde 14.000. godine**

## 5. ASTRONOMSKA NUTACIJA

Nutacija je latinska riječ, a u astronomiji označava kolebanje Zemljine osi rotacije.[3] James Bradley engleski astronom dobio je članstvo u "*Royal Society*" otkrićem aberacije 1.728. godine, a ujedno je to razlog zbog kojeg 1.744. godine dobiva poziciju vođenja zvjezdarnice Greenwich i značajne količine novca i instrumenata za nastavak svojih istraživanja. Nedugo nakon što je došao na tu poziciju otkrio je i objasnio astronomsku nutaciju mjereći ekvatorske koordinate zvijezda na zvjezdarnici u Greenwichu između 1.742. i 1.784. godine [15]. Mehaničko tumačenje već je 1.749. godine dao Jean le Rond' Alembert (1.717. – 1.783.). [3]

Deklinacija Sunca se mijenja i tijekom godine, Sunce dva puta prividno prođe kroz ravninu nebeskog ekvatora, a Mjesec stvarno više od 24 puta. Zbog toga se mijenja moment sila koji utječe na precesiju, pa se i pravi pol ne giba oko pola ekliptike po kružnici i jednolično. Pravi pol nekad prednjači, a nekad zaostaje za gibanjem zamišljenoga srednjeg pola po kružnici. Također je pravi pol nekad bliže, a nekad je dalje od pola ekliptike. To njegovo kolebanje zove se nutacija. Najizrazitija je astronomska nutacija, koju najviše uzrokuje retrogradno gibanje čvorova Mjesečeve staze po ekliptici.

Ako se u jednom trenutku uzlazni čvor Mjesečeve staze nađe u proljetnoj točki, onda deklinacija Mjeseca može postići vrijednost:  $23^{\circ}27'+5^{\circ}9'=28^{\circ}36'$ . Nakon isteka oko 9 godina taj će isti čvor doći u jesensku točku, pa će deklinacija Mjeseca postići vrijednost:  $23^{\circ}27'-5^{\circ}9'=18^{\circ}18'$ . Zapravo se nagib Mjesečeve staze mijenja od  $4^{\circ}59'55''$  do  $5^{\circ}17'13''$ , a čvor njegove staze obiđe ekliptiku za 6793,6 dana= $18 \frac{2}{3}$  godine.

Pravi pol će napraviti jedno valovito gibanje oko srednjeg pola u periodu od 18,6 godina. U jednoj Platonovoj godini takvih valovitih gibanja će biti:  $\frac{25791}{18,6} = 1386,6$  valova.

Ima i drugih utjecaja na gibanje Zemljinih polova, tako da se oni neprekidno malo gibaju. Jedan od uzroka je i to što Zemlja nije čvrsto, već elastično tijelo. Seth Carlo Chalender Jr. je u Washingtonu 1.892. godine otkrio da zemljopisne širine variraju s periodom od 14 mjeseci. To je tzv. slobodna nutacija. Nađeno je da uz ovu varijaciju postoji i godišnja izazvana meteorološkim pojavama sezonskog karaktera. Amplitude kolebanja su vrlo male: u 14-mjesečnim kolebanjima svega 0,1" (6 m na Zemljinoj površini), a u godišnjim još manje (oko 3 m). Ta se kolebanja u ovisnosti o fazi zbrajaju ili

oduzimaju, izazivajući gibanje pola po spirali. Spirala se rasteže ili steže ne udaljavajući pol više od 10 m od srednjeg položaja. [3]

Nutacija utječe na promjenu nebesko-ekvatorskih koordinata. Utjecaj se može kao i kod precesije izvesti iz relacije za drugi astronomski trokut (slika 14):

$$\sin d = \sin b \cdot \cos i + \cos b \cdot \sin i \cdot \sin l \quad (25)$$

$$\cos d \cdot \sin \alpha = -\sin b \cdot \sin i + \cos b \cdot \cos i \cdot \sin l \quad (26)$$

$$\cos d \cdot \cos \alpha = \cos b \cdot \cos l \quad (27)$$

Budući da nutacija mijenja nagib i longitudu, diferencira se relacija (25) po  $d, i$  i  $l$ :

$$\cos d \Delta d = (-\sin b \cdot \sin i + \cos b \cdot \cos i \cdot \sin l) \Delta i + \cos b \cdot \sin i \cdot \cos l \Delta l \quad (28)$$

ili po relaciji (26) i (27) uz  $\Delta l = \Delta p$  (nutacija u longitudi jednaka je promjeni opće precesije):

$$\Delta d = \sin \alpha \cdot \Delta i + \sin i \cdot \cos \alpha \cdot \Delta p \quad (29)$$

Diferenciranjem relacije (27) po  $d, \Delta$  i  $l$ , dobiva se:

$$\sin d \cdot \cos \alpha \cdot \Delta d + \cos d \cdot \sin \alpha \Delta \alpha = \cos b \cdot \sin l \Delta l \quad (30)$$

odnosno uvrštavanjem relacije (29):

$$\cos d \cdot \sin \alpha \cdot \Delta \alpha = \Delta p (\cos b \cdot \sin l - \sin i \cdot \cos^2 \alpha \cdot \sin d) - \sin d \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha \Delta i \quad (31)$$

Budući da je  $\cos b \cdot \sin l = \sin d \cdot \sin i + \cos d \cdot \cos i \cdot \sin \alpha$  te  $\cos^2 \alpha = 1 - \sin^2 \alpha$  dobiva se:

$$\cos d \cdot \sin \alpha \cdot \Delta \alpha = \Delta p (\sin d \cdot \sin i \cdot \cos d \cdot \cos i \cdot \sin \alpha - \sin i \cdot \sin d + \sin i \cdot \sin d \cdot \sin^2 \alpha) - \sin d \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha \Delta i \quad (32)$$

$$\cos d \cdot \sin \alpha \cdot \Delta \alpha = \cos d \cdot \sin \alpha \cdot \Delta p \cdot (\cos i + \tan d \cdot \sin \alpha) - \sin d \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha \cdot \Delta i \quad (33)$$

$$\Delta \alpha = (\cos i + \sin i \cdot \tan d \cdot \sin \alpha) \cdot \Delta p - \tan d \cdot \cos \alpha \Delta i \quad (34)$$

Relacije (29) i (34) su analitički izrazi utjecaja nutacije na promjenu rektascenzije i deklinacije. Veličina  $\Delta p$  i  $\Delta i$  dobivene su iz velikog broja motrenja i u funkciji su longitude ulaznog čvora Mjesečeve staze. Nutacija u longitudi je:

$$\Delta p = -17,234'' \sin \Omega, \text{ a u nagibu: } \Delta i = 9,21'' \cos \Omega$$

U astronomskoj navigaciji ovaj utjecaj dolazi zajedno s utjecajem precesije za korekciju koordinata navigacijskih zvijezda u tablicama za zračnu navigaciju. [3]



## 6. UTJECAJ ASTRONOMSKE PRECESIJE NA KLIMATSKE PROMJENE

Tijekom dugog vremenskog perioda astronomska precesija uzrokuje goleme promjene godišnjih doba [3]. Siderički period precesije Zemljine osi iznosi 25.800 godina. To je period u kojemu Zemljina os se ponovno nađe usmjerena prema istomu dijelu nebeske sfere, te ujedno proljetna točka opiše puni krug po ekliptici. Ova pojava se naziva Platonova godina u spomen na Platona koji je vjerovao da postoji velika godina, te da se nakon nje ponavlja jednaki razmještaj svih nebeskih tijela [11]. Tijekom tog procesa događaju se značajne promjene godišnjih doba. Najizraženije je otprilike na polovici puta odnosno 12.896 godina, a u tom se vremenu ljeto i zima potpuno zamjene. To znači da sjevernoj hemisferi ljeto će padati u današnje zimsko doba, zima u ljetno doba. [3]

### 6.1 MILANKOVIĆEVA TEORIJA KLIMATSKIH PROMJENA

Dugo vremena se nije imalo znanstveno objašnjenje za promjene u klimama to jest o ostacima glacijala na kontinentima. Prva teorija o klimatskim promjenama je nastala sredinom 19 stoljeća. Švicarski geolog Louis Agassiz u knjizi „Teorija o Ledenom dobu“ 1.840. godine prvi je iznio spoznaje o hladnom razdoblju u bliskoj geološkoj povijesti. Agassizova teorija je izazvala velike rasprave, jer u doba kad je iznio svoju teoriju i dalje je religijski pogled na svijet bio izrazito utjecajan, a glacijali koji su nastali smatralo se posljedicom biblijskog potopa. Iako su dokazana postojanja ledenog doba geološkim i paleontološkim istraživanjima, trebalo je objasniti uzroke tih velikih klimatoloških promjena u geološkoj povijesti. Jednu od boljih teorija koja je testirana i priznata u znanstvenim krugovima iznio je znanstvenik sa naših područja Milutin Milanković.

Tijekom Prvog svjetskog rata, Milanković je napravio proračune, te na temelju njih postavio dvije osnovne pretpostavke:

1. *“Klima na Zemlji ovisi od intenziteta osunčavanja njene površine, odnosno od količine Sunčeve energije koju pojedini dijelovi površine Zemlje primaju od Sunca.”*
2. *“Intenzitet osunčavanja Zemlje (ukupno i pojedinih dijelova) promjenljiva je kategorija u geološkom vremenu ovisno od udaljenosti i položaja Zemlje prema Suncu koji se mijenjaju.”*

Nadalje temeljem postavljenih pretpostavki i složenim proračunima ustanovio je 3 astronomska elementa koji utječu i reguliraju promjenu inteziteta osunčavanja Zemlje, tj. klimatske promjene kroz geološku povijest:

- *“Periodičnu promjenu smjera osi Zemlje (precesija) s ciklusom od 23.000 godina.”*
- *“Periodičnu promjenu ekscentriteta Zemljine putanje, do koje dolazi zbog međusobnih utjecaja planeta - u ciklusu od 105.000 godina.”*
- *“Periodičnu promjenu nagiba ekliptike, također, zbog međusobnih smetnji planeta - u ciklusu od 41.000 godina.”*

Na temelju stalnih i složenih promjena na putanju Zemlje, koristeći složene matematičke operacije moguće je izračunati i pratiti geološku prošlost ujedno i za budućnost.

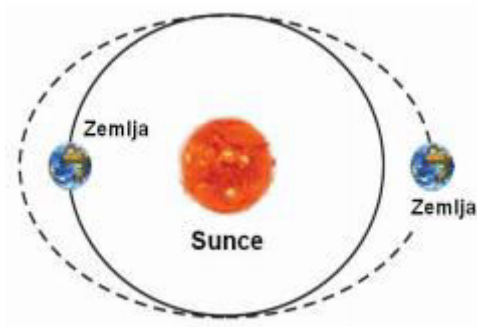
*“Prema teoriji akademika Milankovića ledena doba i međuledena razdoblja na Zemlji uzrokovani su cikličkim promjenama u ophodnji Zemlje oko Sunca kroz tri varijacije:*

1. *Ekscentričnost eliptične putanje Zemlje*
2. *Nagibu osi Zemlje*
3. *Precesija*

*Ove su orbitalne varijacije krajem 20. stoljeća u znanosti nazvane Milankovićevim ciklusima.”* [4]

### **6.1.1. Ekscentričnost orbite**

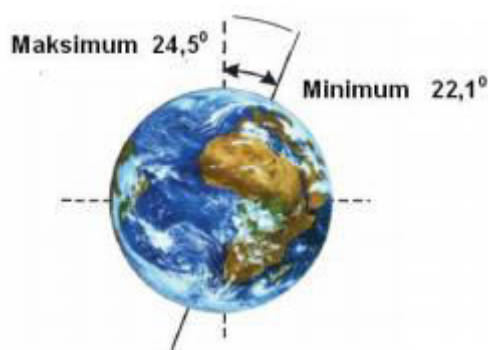
Prvi Milankovićev ciklus je ekscentričnost eliptičnog oblika putanje Zemlje oko Sunca. Zemljina orbita neprekidno mjenja svoj oblik od 0 do 5% eliptičnosti. Tijekom 100.000 godina oblike elipse varira od 0,005 do 0,6% (slika 22). Eliptičnost orbite određuje koliko Sunčeve zrake ozračuju Zemlju. Kada je mala eliptičnost razlike osunčavanja nisu značajne te su ujedno i razlike između godišnjih doba nisu velike. Ukoliko je velika eliptičnost tada su velike i značajne razlike u godišnjim dobima. Najudaljenija točka putanje Zemlje oko Sunca naziva se afel, a najbliža perihel. Kada je Zemlja bliža perihelu zime su blaže na sjevernoj hemisferi, a kada je ekscentričnost najveća tada je sezonska razlika primljene topline u rasponu od 20 do 30%. Trenutno je ekscentričnost orbitalne elipse skoro minimalna (0,0167%), primljena toplina varira između sezona oko 7%. [4]



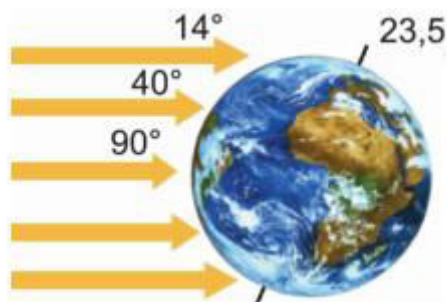
**Slika 21. Ekscentričnost orbite Zemlje oko Sunca [4]**

### 6.1.2. Promjena nagiba Zemljine osi

Drugi Milankovićev ciklus je promjena nagiba osi Zemlje u odnosu na ravninu orbite oko Sunca. Zemljina os oscilira u rasponu od  $22,10^\circ$  do  $24,50^\circ$  (slika 23), a ciklus traje 41.000 godina. Današnji nagib osi iznosi  $23,440^\circ$  i opada. Kut upada sunčevih zraka na Zemljina površinu se izmjenjuje i utječe na klimatska obilježja godišnjih doba (slika 24); ukoliko je malen nagib Zemljine osi insolacija je ravnomjerno podijeljena između ljeta i zime, kao i na djelove Zemlje odnosno utječe na razliku insolacije između ekvatorijalnog i polarnog pojasa. Suprotno je kada je nagib velik, razlika je izraženija u temperaturama godišnjih doba, na ekvatorijalnom pojasu utjecaj je zanemariv dok na polarni pojas ima značajan utjecaj. Relativnim porastom nagiba od 10% ukupno primljena energija na sjevernoj hemisferi ljeti se poveća za 1%. [4]



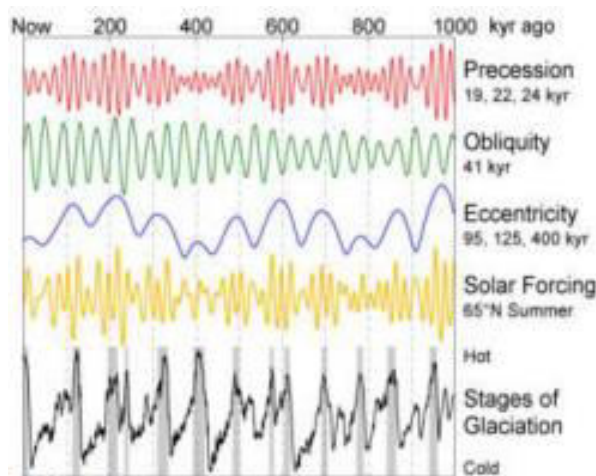
**Slika 22. Promjena osi nagiba rotacije Zemlje u odnosu na ravninu orbite [4]**



Slika 23. Kut upada sunčevih zraka na Zemlju [4]

### 6.1.3. Zajedničko djelovanje ciklusa

Zajedničko djelovanje ovih ciklusa utječe na dolazeću energiju Sunca na Zemlju i oni su glavni uzroci klimatskih promjena i dolazaka do ledenih doba. Određivanjem parametara uz pomoć ovih ciklusa Milanković je uspio odrediti sezonske modifikacije u razdoblju 600.000 godina. Glavni parametar ove teorije je količina sunčevih zraka koja doprije na tlo u srpnju na  $65^\circ$  sjeverne zemljopisne širine. Razlog tomu jest ukoliko se tlo ne zagrije dovoljno dovoljno ledeni pokrov će se širiti i rasti. Isto vrijedi i obrnuto, ako je prevelika količina sunčeve energije, ledeni pokrov će se povući i smanjivati. Tim je zaključio da male orbitalne varijacije imaju velik utjecaj na klimatske promjene na Zemlji. Na (slici 25) je prikazan vremenski period od milijun godina počevši od sadašnjosti prema prošlosti, crvenom bojom (Precession) je prikazan utjecaj precesije, zelenom bojom (Obliquity) zakrivljenost zemlje, plavom bojom (Eccentricity) ekscentricitet, žutom bojom (Solar Forcing) količina sunčevih zraka koja doprije na  $65^\circ$  zemljopisne geografske širine te crnom bojom (Stages of Glaciation) stadiji vremenske temperature. [4]



Slika 24. Učinak Milankovićevih ciklusa na osunčavanje Zemlje [4]

## 7. ZAKLJUČAK

Današnji brodovi su opremljeni suvremenom elektronskom opremom za navigaciju. Moderna tehnologija poput satelitskog sustava pozicioniranja pomorcu omogućava brzu, laku i točnu poziciju u svega nekoliko trenutaka. Međutim ova i sva ostala moderna tehnologija nije neovisna i savršena, te u svakom trenutku iz bilo kojeg razloga može zakazati. Stoga je za pomorca veoma bitno da zna osnove astronomske i terestričke navigacije.

Čovjekova opčinjenost proučavanjem neba i nebeskih objekata potječe još od davnoga antičkog vijeka. Astronomska navigacija se u prošlosti zbog nužnosti postupno razvijala. U moderno vrijeme koristeći tehnologiju za poboljšavanje starih navigacijskih uređaja i stvaranjem priručnika koji pomorcu daju točne podatke o nebeskim objektima koje smjera pomorac može dobiti zapanjujuće točnu poziciju. Ipak danas astronomska navigacija nije primarna za navigaciju no svakako bi je svaki pomorac morao znati, iz jednostavnog razloga što je astronomska navigacija jedina neovisna vrsta navigacije i u svakom trenutku dostupna.

Iako se čini kako astronomska precesija skoro pa i nema utjecaj na navigaciju, zato što veoma pomalo utječe na prividno kretanje nebeskih objekata, u stvarnosti ono dugoročno ima iznimno velik utjecaj na navigaciju. To se može vidjeti na primjeru polarne zvijezde (sjeverna hemisfera) i njenom korištenju za orijentaciju u prostoru. . U starom vijeku zvijezda Thuban se koristila, a danas Sjevernjača, a u dalekoj budućnosti će se koristiti zvijezda Vega. Također, astronomska precesija utječe na još jednu bitnu stvar što se tiče svih ljudi, a ne samo pomoraca, a to je da uzrokuje velike ciklične promjene klime na cijeloj planeti Zemlji.

## LITERATURA

- [1] Bilić, T.: Navigacija prema zvijezdama u prehistoriji i antici (1. dio), Naše more, Vol. 51, br. 5-6, Veleučilište u Dubrovniku, int. izv.:  
[https://hrcak.srce.hr/index.php?show=clanak&id\\_clanak\\_jezik=12820](https://hrcak.srce.hr/index.php?show=clanak&id_clanak_jezik=12820), 2004.
- [2] Bilić, T.: Navigacija prema zvijezdama u prehistoriji i antici (2. dio), Naše more, Vol. 52., br. 1-2, Veleučilite u Dubrovniku, int. izv.:  
[https://hrcak.srce.hr/index.php?show=clanak&id\\_clanak\\_jezik=12792](https://hrcak.srce.hr/index.php?show=clanak&id_clanak_jezik=12792), 2005.
- [3] Franušić, B.: Astronomska navigacija I, Dubrovnik, 1989.
- [4] Ivanović, M.: Djelo Milutina Milankovića (1879.-1958.) među najznačajnijim znanstvenim postignućima XX. stoljeća,  
<http://www.panon.eu/tekst/hr/79/28%20Milankovic%20HAZU.pdf>
- [5] Kulišić, P.: Mehanika i toplina, Školska knjiga, Zagreb, 2005.
- [6] Zovko, V.: Tajne srednjovjekovnih moreplovaca, Naše more, Vol. 21., br. 21., Sveučilište u Zadru, int. izv.:  
[https://hrcak.srce.hr/index.php?show=clanak&id\\_clanak\\_jezik=153430](https://hrcak.srce.hr/index.php?show=clanak&id_clanak_jezik=153430) 2012.
- [7] Hrvatska enciklopedija, Leksikografski zavod Miroslav Krleža, Zagreb, 1999.  
<http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=3909>
- [8] Hrvatska enciklopedija, Leksikografski zavod Miroslav Krleža, Zagreb, 1999.  
<http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=4314>
- [9] Hrvatska enciklopedija, Leksikografski zavod Miroslav Krleža, Zagreb, 2002.  
<http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=25596>
- [10] Hrvatska enciklopedija, Leksikografski zavod Miroslav Krleža, Zagreb, 2005.  
<http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=41260>
- [11] Hrvatska enciklopedija, Leksikografski zavod Miroslav Krleža, Zagreb, 2006.  
<http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=48645>
- [12] Astronomsko Tumačenje Mitraističkih Misterija, Fragmenti, Časopis studentskog kluba arheologa filozofskog fakulteta u Zagrebu  
<https://arheo.ffzg.unizg.hr/ska/fragmenti/2-3/mitraistickeMisterije.htm>
- [13] <http://www.artepreistorica.com/2009/12/ice-age-people-find-their-ways-by-the-stars-a-rock-picture-in-the-cueva-de-el-castillo-spain-may-represent-the-circumpolar-constellation-of-the-northern-crown-crb/>
- [14] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Datoteka:Spherical\\_astrolabe\\_2.jpg](https://hr.wikipedia.org/wiki/Datoteka:Spherical_astrolabe_2.jpg)

[15] <https://www.britannica.com/biography/James-Bradley>

## POPIS SLIKA

Slika 1. Zvrk [5].....	2
Slika 2. Slobodan zvrk [5].....	3
Slika 3. Precesija zvrka [5].....	4
Slika 4. Prikaz Sjeverne Krune 11.000 g.p.n.e.....	7
Slika 5. Sjeverna Krna iz špilje Cueva de el Castillo 11.000 g.p.n.e [13].....	8
Slika 6. Sjeverna Krna danas.....	8
Slika 7. Veliki Medvjed, Mali Medvjed i Vodena zmija 2.800 g.p.n.e.....	10
Slika 8. Veliki Medvjed, Mali Medvjed i Vodena zmija danas.....	10
Slika 9. Armilarna sfera [7].....	11
Slika 10. Sferni astrolab [14].....	12
Slika 11. Plosnati Astrolab [8].....	12
Slika 12. Oznake na Zemlji za astronomsku precesiju [3].....	14
Slika 13. Drugi astronomski trokut [3].....	17
Slika 14. Izvedeni sferni trokut za proračun utjecaja precesije na koordinate nebeskih tijela.....	18
Slika 15. Položaj zvijezde Thuban 2.849. g.p.n.e.....	20
Slika 16. Položaj Polare i Kochab 15.st.p.n.e pogled iz Atene.....	21
Slika 17. Položaj Polare i Kochab danas pogled iz Atene.....	21
Slika 18. Položaj Polare 2.100. godine.....	22
Slika 19. Prikaz položaja zvijezda 12.000. godine (nedostatak sjeverne zvijezde).....	22
Slika 20. Prikaz položaja zvijezde Vega kao sjeverne zvijezde 14.000. godine.....	23
Slika 21. Ekscentričnost orbite Zemlje oko Sunca [4].....	29
Slika 22. Promjena osi nagiba rotacije Zemlje u odnosu na ravninu orbite [4].....	29
Slika 23. Kut upada sunčevih zraka na Zemlju [4].....	30
Slika 24. Učinak Milankovićevih ciklusa na osunčavanje Zemlje [4].....	30



