

Gibanje Zemlje in merjenje časa



JURE JAPELJ

→ Spremenljivo nočno nebo in letni časi sta le dve izmed mnogih posledic gibanja Zemlje. Kljub temu, da se o gibanju Zemlje učimo že od malih nog, pa je vseeno tako neintuitivno in v nasprotju z vsakodnevnim izkustvom, da moramo za njeno razumevanje napraviti kar nekaj miselnih akrobacij. V tem prispevku si pogledjmo, kako se Zemlja giblje v Osončju in kakšne posledice ima gibanje na naš vsakdan.

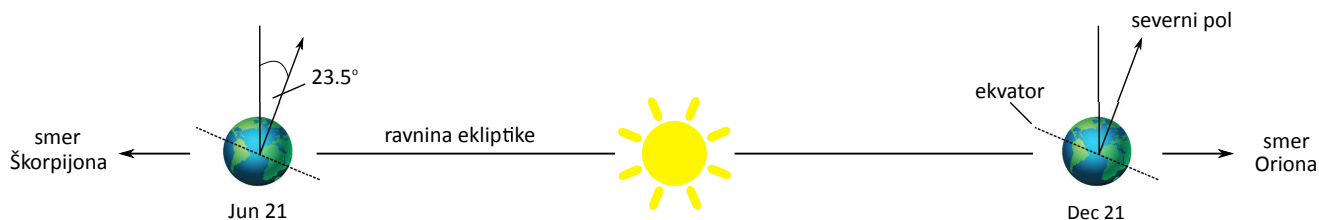
Starodavne civilizacije so že davno tega spoznale, da so nebesni pojavi ciklične narave. Opazovali so Lunine mene, navidezno pot Sonca po nebu ter spreminjanje položaja ozvezdij na nočnem nebu. Poznavanje nebesnega gibanja je vodilo do prvih koledarjev, s katerimi so si ljudje pomagali pri načrtovanju sajenja in pobiranja pridelkov. Starodavni astronomi so v tisočletjih podrobnih sistematičnih opazovanj neba prepoznali številne vzorce in uspeli dokaj natančno napovedati gibanje nebesnih teles, med drugim tudi Sončeve in Lunine mrke.

Pravo razumevanje naravnih pojavov je prišlo z zavedanjem, da Zemlja ni statična, temveč se giblje. Potreben je kar precejšen miselni preskok, da sebe kot opazovalca postavimo v gibajoč sistem. Kljub posameznim briljantnim dognanjem antičnih matematikov in astronomov je do širšega soglasja o medsebojnem gibanju Zemlje, Sonca in planetov prišlo šele proti koncu šestnajstega stoletja. Danes vemo, da se Zemlja vrti okoli svoje osi ter kroži okoli Sonca. Naša najbližja zvezda se giblje okoli centra Galaksije, ta pa je prav tako del širšega kozmičnega plesa galaksij. A za nas najpomembnejše je gibanje Zemlje v Osončju, na kar se osredotočamo v tem prispevku.

V nadaljevanju predpostavljamo, da se opazovalec nahaja na severni zemeljski polobli.

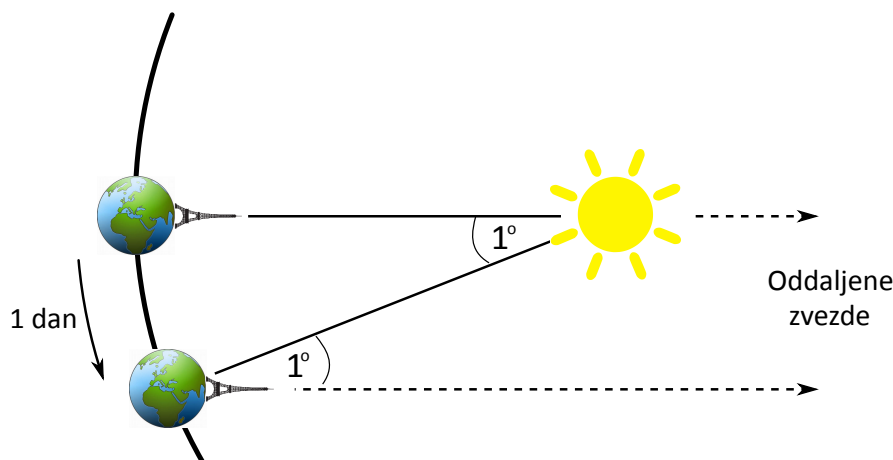
Sončev in zvezdni čas

Zemlja se giblje okoli Sonca v *ekliptični* ravnini (slika 1). Obenem se vrti tudi okoli svoje osi. Le tisti del Zemlje, ki je v danem trenutku obrnjen proti Soncu, je osvetljen. Prva posledica tega gibanja je torej izmenjavanje dneva in noči. Zemlja se vrti od zahoda proti vzhodu. Za opazovalca na Zemlji torej Sonce



SLIKA 1.

Stranski pogled na ekliptično ravnino. Zemlja se vrti okoli svoje osi, ki je za 23,5° nagnjena glede na ekliptično ravnino.


SLIKA 2.

Zemlja se mora vsak dan zavrteti skoraj za 361° , da z enako stranjo zopet gleda na Sonce.

vzide na vzhodu, doseže najvišjo točko ter nato zide. Opisana ciklična gibanja so se izkazala za naraven način merjenja časa. Eno leto je čas, v katerem Zemlja enkrat obide Sonce. Dan pa je definiran kot povprečen čas med dvema zaporednima prehodoma Sonca, najvišje točke na nebu. Taki definiciji dneva pravimo *Sončev dan*, ki traja 24 ur¹.

Za potrebe orientacije na nebu si je uporabno predstavljati, da Zemljo obdaja ogromna nebesna sfera, na katero so pritrjene zvezde. Ker stojimo na vrteči Zemlji, se nam med nočnim opazovanjem neba zdi, da se nebesna sfera vrti. Zvezde krožijo okoli navidezno nepremične točke v bližini zvezde Severnice. To je točka, kamor kaže os vrtenja Zemlje ali severni pol. Če bi natančno opazovali položaje zvezd, bi izmerili, da Zemlja za en obhod okoli svoje osi potrebuje dobrih 23 ur in 56 minut, kar imenujemo *zvezdni* ali *siderski dan*. Siderski dan, merjen relativno na oddaljene zvezde, se torej razlikuje od Sončevega dneva. Zakaj takšna razlika?

Zemlja naredi en obrat ali 360° v siderskem dnevu. A v tem času je Zemlja potovala okoli Sonca, pri čemer se je premaknila za nekaj manj kot stopinjo (slika 2). Zemlja se mora zavrteti za skoraj 361° , če želimo, da Sonce za opazovalca najvišjo točko na nebu doseže ob istem času ob dveh zaporednih dnevih. Planet potrebuje približno štiri minute, da se za-

vrti za dodatno stopinjo. Opazimo, da ima sidersko leto en dan več od Sončevega. To lahko zapišemo z enačbo

$$\frac{P}{\tau_*} - \frac{P}{\tau} = 1, \quad (1)$$

oziroma

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_*} - \frac{1}{P}, \quad (2)$$

kjer je P čas obhoda Zemlje okoli Sonca (ali perioda), τ_* je trajanje siderskega dne, τ pa Sončevega dne.

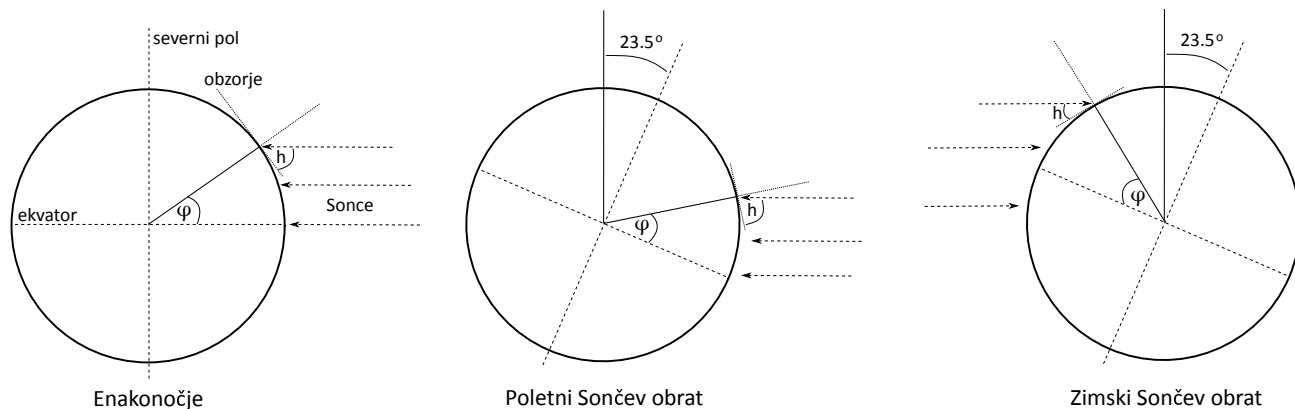
Praktična posledica razlike med siderskim in Sončevim dnevom za zvezdogleda je, da določena zvezda vsako noč vzide štiri minute bolj zgodaj kot prejšnjo noč. Čez leto se zato spreminjajo tudi ozvezdja, ki jih vidimo na nebu. V zimskih mesecih je visoko na nebu ozvezdje Oriona, medtem ko v poletnih nad nami kraljuje ozvezdje Škorpiona.

Nagnjena os vrtenja in letni časi

Zemljina os vrtenja ni pravokotna na ekliptično ravnino, temveč nagnjena za $23,5^\circ$ od navpičnice (slika 1). Nagnjena os je glavni vzrok za pojav letnih časov na Zemlji, saj v veliki meri določa, kako se Sonce giba po nebu skozi leto.

Če vsak dan ob istem času opazujemo Sonce, opazimo, da se njegov položaj na nebu spreminja. Poleti je Sonce višje na nebu kot pozimi. Višina Sonca je odvisna tudi od geografske širine, na kateri se nahajamo. Odvisnost spreminjanja višine med letom

¹Egipčani so dan razdelili na 24 ur, kar je delno posledica vzhajanja določenih zvezd na nebu, delno pa njihovega štetja, ki je temeljilo na osnovi 12 namesto 10. Zaradi zapletenega gibanja se je dolžina egipčanske ure spreminjala. Grki so privzeli 24-urni dan ter z natančnimi meritvami določili fiksno dolžino ure.



SLIKA 3.

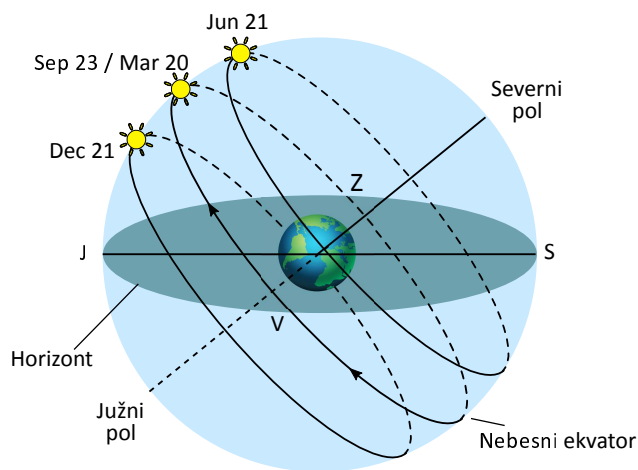
Višina Sonca na nebu h za opazovalca na geografski širini φ ob enakonočju (levo), poletnem solsticiju (sredina) in zimskem solsticiju (desno).

je razložena na sliki 3 ob treh mejnih primerih (za boljšo predstavo se ozrite tudi na sliko 1, sliko 4 in sliko 5). Pot Sonca na nebu skozi leto, imenovana *ekliptika*, se pomika severno in južno od ekvatorja. Ekvator prečka dvakrat, in sicer okoli 20. marca in 23. septembra. Dogodka imenujemo enakonočje ali ekvinokcij. Če Zemljina os vrtenja ne bi bila nagnjena, bi Sonce vedno ostalo nad ekvatorjem. Zaradi nagnjenosti pa Sonce navidezno potuje severno od ekvatorja in okoli 21. junija, ob poletnem Sončevem obratu ali solsticiju, doseže najvišjo točko. Nato se začne njegova pot proti jugu, ob jesenskem enakonočju prečka ekvator in okoli 21. decembra, ob zimskem Sončevem obratu, doseže najnižjo točko.

Sedaj je jasno, zakaj imamo na Zemlji letne čase. Sonce je precej višje na nebu med poletnim kot zimskim Sončevim obratom. To pomeni, da je Sonce dalj časa na nebu – poleti je dan veliko daljši kot pozimi – in je severna polobla osvetljena dalj časa. Še več, snop svetlobe s Sonca poleti na Zemljo pada pod večjim kotom kot pozimi, zato je prejeta količina svetlobe na enoto površine večja (glej nalogo 4).

Velja omeniti, da se Zemlja okoli Sonca giblje po eliptični orbiti, zato se tako njena hitrost kot oddaljenost od Sonca skozi leto spreminjata. Zmotno je naivno prepričanje, da so letni časi posledica eliptične orbite. Pravzaprav je Zemlja Soncu najbližje januarja, najdlje pa julija. Je pa pri razumevanju

poti Sonca po nebu vseeno potrebno upoštevati učinek eliptične orbite, ki vsekakor ni zanemarljiv. Pot Sonca po nebu moramo razumeti za učinkovito uporabo sončnih elektrarn, arhitekturo in za modeliranje klimatskih sprememb.

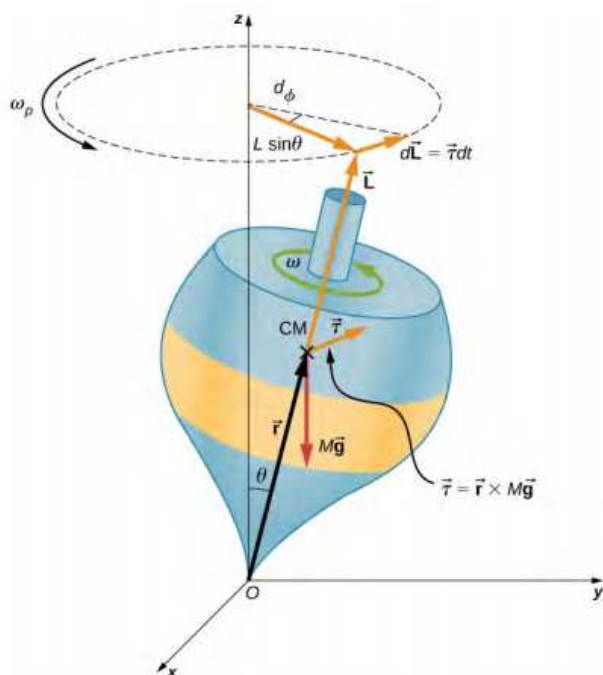


SLIKA 4.

Spreminjanje položaja Sonca na nebu kot posledica nagnjenosti Zemljine osi vrtenja. Nebesni ekvator je ravnina, v kateri leži Zemeljski ekvator (glej tudi sliko 6).

Zemlja kot vrtavka in gibanje pomladišča

Zaradi vrtenja Zemlja nima popolne sferične oblike temveč je na ekvatorju izbočena. Luna in Sonce s svojim gravitacijskim privlakom poskušata poravnati Zemljin ekvator z ekliptično ravnino: vsota sil kaže pravokotno na ekliptično ravnino. A Zemlja se ne da. Posledično je njeno gibanje dokaj zapleteno. Lahko si ga ponazorimo z gibanjem vrtavke (slika 5²). Če nevrtečo vrtavko postavimo pod kotom na ravno površino, bo navor sile gravitacije vrtavko prekucnil. Vrteča vrtavka pa ima vrtilno količino, ki kaže v smeri osi vrtenja. V tem primeru se začne vrtavka vrteti okoli navpičnice, ker je navor vzporeden s površino in pravokoten na smer vrtilne količine. Takemu gibanju pravimo precesija.



SLIKA 5.

Ilustracija precesije vrtavke. Sila gravitacije, delujoč na masno središče, ustvari navor $\vec{\tau}$ v smeri pravokotno na vrtilno količino \vec{L} . Velikost vrtilne količine se ne spremeni, se pa spremeni njena smer. (Vir: OpenStax)

Ravno tako kot vrtavka tudi Zemlja precesira (slika 6) s periodo okoli 26000 let. Praktično to pomeni, da os vrtenja ne kaže ves čas v isto smer, temveč počasi, s kotno hitrostjo $\sim 1^\circ$ na 72 let opisuje krog z radijem $23,5^\circ$. Trenutno se nebesni severni pol nahaja $0,7^\circ$ od zvezde Severnice.

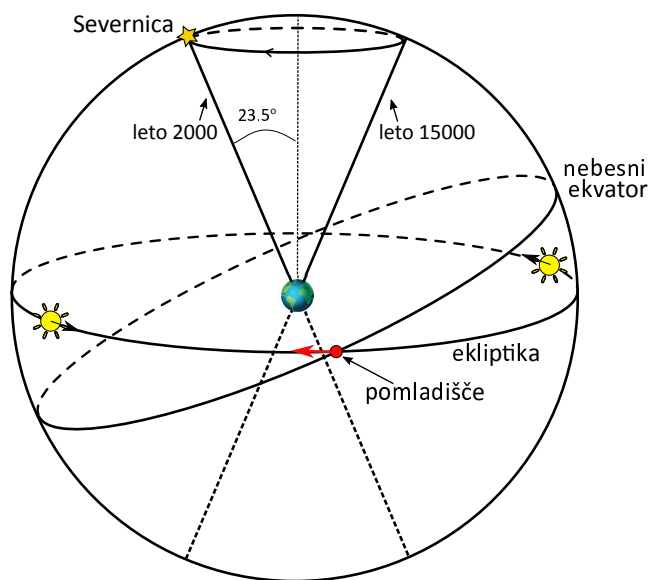
Skupaj z Zemljino osjo se vrtilni nebesni ekvator (slika 6). To pomeni, da se pomladišče–pomladansko enakonočje oz. točka, kjer se sekata ravnini nebesnega ekvatorja in ekliptike–premika s časom. Vsako leto se pomladišče premakne za približno $50''$ glede na zvezde. Sonce tako vsako leto prispe do pomladišča preden naredi celoten krog glede na zvezde. Prvi dan pomladi vsako leto nastopi na zgodnejši datum. Čas med dvema zaporednima obiskoma Sonca v pomladišču imenujemo *tropsko leto*, ki traja 365,2422 dni. *Sidersko leto* po drugi strani traja 365,2564 dni. Kako torej definirati dan? Omenimo, da poleg precesije definicijo dneva onemogoča tudi nestalna hitrost potovanja Zemlje okoli Sonca zaradi eliptične orbite. Ker želimo, da dan v vsakodnevem življenju vsak dan traja enako dolgo, moramo pri merjenju časa narediti določene popravke. Iz zagate se rešimo tako, da si zamislimo *povprečno sonce*, ki se s konstantno hitrostjo giblje po nebesnem ekvatorju in naredi en obhod v tropskem letu. Ta definicija pomeni, da se letni časi glede na naš koledar ne bodo spremenili: poletje bo vedno nastopilo junija in zima decembra. Spreminja pa se položaj Zemlje v orbiti okoli Sonca, ko nastopi določen letni čas.

Žal gibanje Zemlje vsebuje še dodatne komponente. Luna se giblje okoli Zemlje glede na Sonce, zato se njen vpliv na Zemljino gibanje s časom spreminja. Najmočnejši učinek je *nutacija*, pri kateri Zemljina os koleba s periodo 18,6 let. Spreminja se tudi naklon Zemljske osi od navpičnice: s periodo 41000 let se naklon spreminja med $22,1^\circ$ in $24,5^\circ$. Obenem se vrtenje Zemlje okoli svoje osi počasi ustavlja zaradi plimske interakcije z Luno.

Osnova merjenja časa je siderski čas, saj ga lahko natančno izmerimo z opazovanjem vzhajanja in zahajanja nebesnih teles. A zaradi zapletenega gibanja Zemlje natančni čas, ki ga uporabljamo v praksi, vsebuje številne popravke.

Ker število dni v letu ni celo število, se tudi koledar sooča s težavami. Ker leto traja približno 365,25 dni, v koledarju pa imamo samo 365 dni, moramo vsake štiri leta imeti prestopno leto. A ker je prava številka

²phys.libretexts.org/



SLIKA 6.

Zemljina os vrtenja v ~ 26000 letih opiše en krog okoli svoje osi. Posledica precesije je premikanje pomladišča.

malenkost drugačna od 365,25, moramo upoštevati še nekaj dodatnih pravil. Prestopno leto imamo vsake štiri leta, razen če je leto deljivo s 100. Edina izjema so leta deljiva s 400; leto 1900 npr. ni bilo, leto 2000 pa je bilo prestopno. Koledar je današnje podobo dobil leta 1582 (reforme papeža Gregorja XIII). Tudi gregorijanski koledar ni popoln: čez približno 3300 let bo razlika s tropskim letom štela en dan.

Zaključek

Dobro se je zavedati, da je dinamika nebesnih teles zapletena. Zemlja tu ni nobena izjema; podobna gibanja lahko pripišemo tudi drugim telesom v Osončju. Vse skupaj se zdi še bolj zapleteno, kot je v resnici, zaradi naše potrebe po natančnem merjenju časa. Zanimivo je, kako tesno je človeštvo povezano z gibanjem Zemlje. Ciklične spremembe so v ljudeh vzbudile željo po natančnem opazovanju in napovedovanju naravnih pojavov. Bi se človeški kulturni in tehnološki razvoj odvil drugače, če Zemljina os vrtenja ne bi bila nagnjena in bi bil en dan precej bolj podoben drugemu?

Vprašanja

Naloga 1

Luna se okoli Zemlje giblje v nasprotni smeri urnega kazalca. Njen sončni mesec, obhod okoli Zemlje glede na Sonce, traja 29,5 dni, siderski mesec pa 27,3 dni. Kako dolg bi bil Sončev mesec, če bi se Luna okoli Zemlje gibala v obratni smeri? Predpostavite, da se siderski mesec ne spremeni.

Naloga 2

Hitrost vrtenja Zemlje se ustavlja. Pred 600 milijoni let je za en obrat potrebovala 21 ur. Ob predpostavki, da je hitrost ustavljanja konstanta, izračunajte, kdaj je sidersko leto trajalo točno 365,25 dni.

Naloga 3

Neke noči opazujete zvezdo Betelgezo. Ko jo opazujete naslednjič, se je zvezda okoli Severnega pola zavrtela za 15° . Koliko dni je minilo med prvim in drugim opazovanjem, če je ura v obeh primerih kazala enako?

Naloga 4

Luka želi izmeriti geografsko širino, na kateri se nahaja. 21. junija se odpravi iz mesta na odprto polje kjer izmeri, da je Sonce opoldne 67° nad obzorjem.

- Na kateri geografski širini se nahaja Luka? Pomagajte si s sliko 3.
- Kako visoko bo Sonce opoldne ob jesenskem enakonočju?
- Oцени razmerje osvetljenosti tal 21. junija in 21. decembra. Pri oceni zanemari vpliv atmosfere.
- Kako visoko nad obzorjem lahko Luka ponoči pričakuje Severnico?

× × ×

www.dmfa-zaloznistvo.si