

## КУРС АСТРОНОМИЈЕ ЗА ПОЧЕТНИКЕ

### Лекција 3: ЗЕМЉИНА РЕВОЛУЦИЈА

Александар Оташевић

Астрономско друштво „Пуђер Бошковић”, Београд; e-mail: [al.otasevic@gmail.com](mailto:al.otasevic@gmail.com)

#### Земљина револуција и Сунчево привидно годишње кретање

Сунце ротира око једне осе  $S_NSS_S$  (Сл. 1) сталне оријентације, која пролази кроз његово средиште  $S$  и пробија његову површину у два дијаметрално супротна тачкама – Сунчевим ротационим половима. Онај Сунчев пол ( $S_N$ ) из кога гледано Сунце ротира у директном смеру је северни, а онај ( $S_S$ ) из кога гледано ротира у ретроградном смеру је јужни.



Слика 1: Земљина револуција.  $G_N$  и  $G_S$  су северни и јужни географски пол респективно.

Земљино обртно кретање око осе  $O$  постављене кроз средиште Сунца (она се НЕ поклапа са Сунчевом ротационом осом) назива се **Земљиним револуцијом**. Период Земљине револуције износи око  $365^d06^h$  и назива се **тропска година**<sup>1</sup>. Ово своје кретање Земља обавља у директном смеру гледано из северног, одн. ретроградном гледано из јужног Сунчевог пола. Раван Земљине револуције је непроменљива. Земљина ротациона оса  $G_NG_S$  је нагнута под углом од  $66,5^\circ$  у односу на раван Земљине путање око Сунца и тај угао ћемо сматрати непроменљивим.

Питање за Вас: колики угао заклапа раван Земљиног екватора са равни Земљине путање око Сунца?

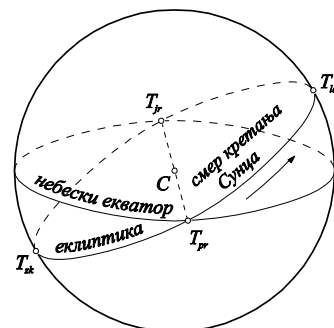
Као и Земљина ротација, Земљина револуција је скоро равномерна (оса, смер и брзина су јој такорећи непроменљиви), тако да је не осећамо – чини нам се да Земља мирује, а да се Сунце креће око ње са истим периодом (око  $365^d06^h$ ), у директном смеру гледано са северне, а ретроградном гледано са јужне Земљине полулопте. То кретање називамо **Сунчевим привидним годишњим кретањем** и оно се обавља у непроменљивој равни. Оно је, дакле, ПРИВИДНО, и само је последица Земљине револуције, која је ПРАВО кретање.

У свом привидном годишњем кретању Сунце пролази кроз 13 сазвежђа, редом: Рибе, Ован, Бик, Близанце, Рак, Лав, Девојку, Вагу, Шкорпију, Змијоношу, Стрелца, Јарца и Водолију, која чине појас на небеској сфери звани **зодијак**.

#### Елементи небеске сфере изведени из Земљине револуције

Круг на небеској сфери по коме Сунце врши своје привидно годишње кретање назива се **еклиптика** (Сл. 2).

Пресечна тачка  $T_{pr}$  еклиптике и небеског екватора у којој се Сунце приликом тог кретања нађе прелазећи са јужне на северну небеску полусферу назива се **тачком пролећне равнодневнице**. Обрнуто, пресечна тачка  $T_{jr}$  еклиптике и небеског екватора у којој се Сунце нађе прелазећи са северне на јужну небеску полусферу назива се **тачком јесење равнодневнице**. Тачка  $T_{ld}$  еклиптике на северној небеској полусфери у којој је Сунце највише удаљено од небеског екватора назива се **тачком летње дугодневнице**. Супротно, тачка  $T_{zk}$  еклиптике на јужној небеској полусфери у којој је Сунце највише удаљено од небеског екватора назива се **тачком зимске краткодневнице**.



Слика 2: Елементи небеске сфере изведени из Земљине револуције.  $C$  је центар небеске сфере.

Еклиптика, тачке летње дугодневнице и зимске краткодневнице, као и равнодневничке тачке су неки од елемената небеске сфере изведени из Земљине револуције.

Питање за Вас: колики угао заклапа раван небеског екватора са равни еклиптике?

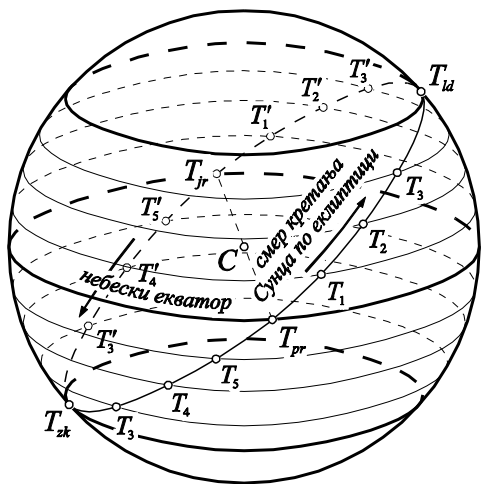
#### Последице привидног годишњег кретања Сунца

Гледано са Земље Сунце истовремено учествује у два привидна кретања: дневном, у ретроградном смеру гледано са северне Земљине полулопте, проузрокованом Земљиним ротацијом и годишњем, у директном смеру гледано са северне Земљине полулопте, проузрокованом Земљиним револуцијом. То је приказано на Сл. 3. Концентрични кругови на слици представљају небеске паралеле Сунца, тј. његове привидне дневне путање, у различитим положајима на еклиптици. По крајњим паралелима (тзв. **небеским повратницима**), приказаним дебљим линијама, Сунце се креће када је у тачки летње дугодневнице ( $T_{ld}$ ), одн. зимске краткодневнице ( $T_{zk}$ ), по небеском екватору, приказаном такође дебљом линијом, оно се креће када је у

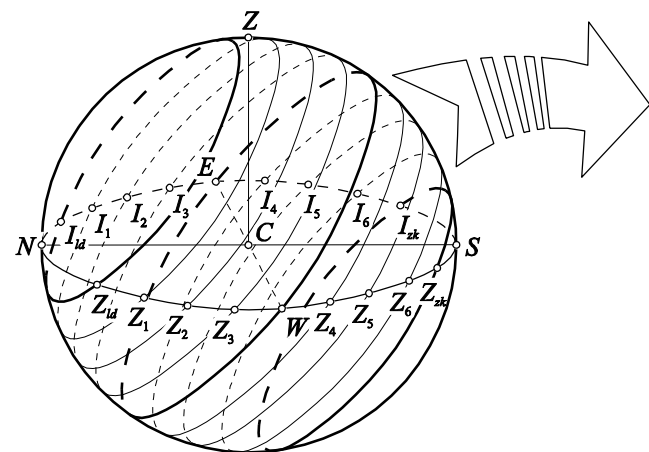
<sup>1</sup> Ово није права дефиниција тропске године, али прихватићемо је за потребе овога курса.

равнодневничким тачкама ( $T_{pr}$  и  $T_{jr}$ ), а када је у неким другим положајима на еклиптици ( $T_1, T_2, T_3, T_4, \dots$ ) оно се креће по одговарајућим преосталим небеским паралелима на слици, приказаним тањим линијама<sup>2</sup>.

Какве последице за посматрача на некој тачки Земљине површине има такво кретање Сунца? На Сл. 4 је приказано привидно дневно кретање Сунца током године за посматрача на некој тачки северне Земљине полулопте. Концентрични кругови представљају исте оне небеске паралеле Сунца који су



Слика 3: Сунчево привидно дневно и годишње кретање по небеској сфери. С је центар небеске сфере. Стрелице показују смер кретања Сунца по еклиптици.



приказани на Сл. 3. Као што је са Сл. 4 очигледно, дужине видљивих и невидљивих лукова ових небеских паралела се разликују, што не значи ништа друго до различиту дужину обданице и ноћи током године. Када је Сунце у некој од равнодневничких тачака током дана се приближно креће по небеском екватору. Како је небески екватор једини небески паралел чији је видљиви лук једнак невидљивом<sup>3</sup> то ће тада обданица бити исте дужине као и ноћ. Та појава се назива **равнодневницим** и дешава се два пута годишње: када је Сунце у тачки  $T_{pr}$  (20. или 21. марта) – **пролећна равнодневница** и када је у тачки  $T_{jr}$  – **јесења равнодневница** (22. или 23. септембра). И све друге комбинације дужина обданице и ноћи дешавају се два пута годишње јер се Сунце на сваком небеском паралелу нађе два пута годишње (Сл. 3). Изузетак од овога правила чине небески повратници – на свакоме од њих Сунце се нађе

само једанпут годишње (Сл. 3): када је у тачки  $T_{ld}$  и када је у тачки  $T_{zk}$ . Када је у  $T_{ld}$ , видљиви лук Сунчеве дневне путање је очигледно најдужи, а невидљиви најкраћи у години (Сл. 4), тј. тада је обданица најдужа, а ноћ најкраћа и та појава се назива **летњом дугодневницим**. Она наступа 21. или 22. јуна. Када је Сунце у  $T_{zk}$ , видљиви лук Сунчеве дневне путање је очигледно најкраћи, а невидљиви најдужи у години, тј. тада је обданица најкраћа, а ноћ најдужа и та појава се назива **зимском краткодневницим**. Она наступа 21. или 22. децембра.

Са Сл. 4 се види да се тачке излаза и залаза Сунца током године померају по правом хоризонту NWSE. На дане равнодневница Сунце излази тачно на истоку (у источној тачки хоризонта E), а залази на западу (у западној тачки хоризонта W). На дан летње дугодневнице излази и залази најсеверније (тачке  $I_{ld}$  и  $Z_{ld}$  респективно), а на дан зимске краткодневнице најјужније (тачке  $I_{zk}$  и  $Z_{zk}$  респективно). У остале дане излази и залази у тачкама између горе поменутих ( $I_1, I_2, I_3, \dots$ , одн.  $Z_1, Z_2, Z_3, \dots$ ).

Промена дужине обданице и ноћи током године за неко место на Земљи и померање тачака излаза и залаза Сунца током године за једно место на Земљи су прве две последице привидног годишњег кретања Сунца.

Питања за Вас: када оса Земљине ротације не би била нагнута у односу на раван Земљине путање око Сунца

Слика 4: Видљиви и невидљиви лукови Сунчеве привидне дневне путање и тачке излаза и залаза Сунца за неко место на северној Земљиној полулопти током године. С – центар небеске сфере; N, W, S и E – северна, западна, јужна и источна тачка хоризонта респективно; Z – зенит.

(што би значило да заклапа прав угао са њом) да ли би се дужина обданице и ноћи за неко место на Земљи мењала током године и зашто? Какав би тада био међусобни однос дужина обданице и ноћи и зашто? Да ли би се тада тачке излаза и залаза Сунца померале и зашто?

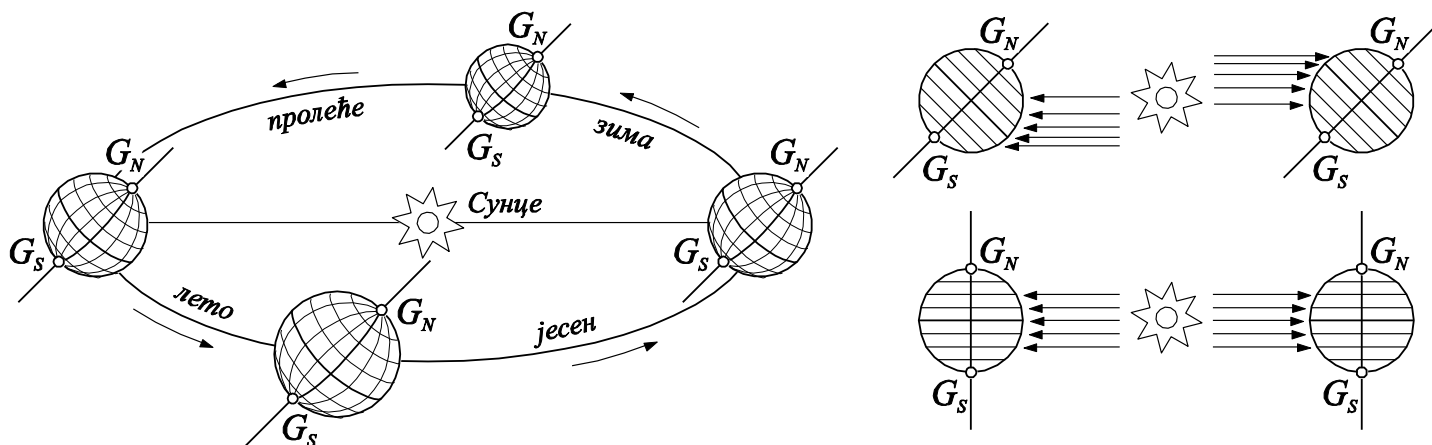
Како се са Сл. 4 види и подневна висина Сунца над хоризонтом се мења током године. Наиме, за посматрача на северној Земљиној полулопти на дан зимске краткодневнице та висина је најмања (угао  $h_{zk}$  под којим Сунчеви зраци падају на тло), а на дан летње дугодневнице највећа (угао упада Сунчевих зракова на тло  $h_{ld}$ ). У остале дане подневна висина Сунца, тј. угао упада његових зракова на тло варира између ових двеју вредности. Како то изгледа хипотетичком посматрачу са велике удаљености од Земље приказује Сл. 5.

У положају 1 Земља се налази на дан летње дугодневнице. Тада (и око тог положаја) Сунчеви зраци директно осветљавају северну Земљину полулопту, тј. падају под великим углом на њу. То значи да на јединицу површине северне Земљине полулопте пада већа количина топлоте<sup>4</sup>. Истовремено, како се види са Сл. 4, тада су обданице најдуже, тј. Сунце проводи највише времена над

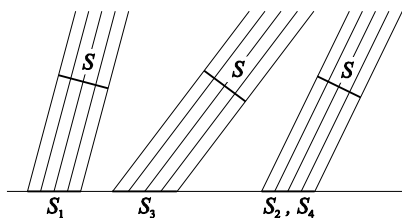
<sup>2</sup> У ствари, током дана Сунце се не креће по једном небеском паралелу него непрекидно прелази са једног на други, а то зато што се непрекидно креће по еклиптици. Услед тога резултантна Сунчева путања по небеској сфери, настала услед оба његова привидна кретања, је завојница (линија облика опруге) – са крајевима и најмањим пречником на небеским повратницима, а највећим пречником на небеском екватору.

<sup>3</sup> Постоје на Земљи места за која су видљиви и невидљиви лук сваког небеског паралела међусобно једнаки. Где се налазе та места?

<sup>4</sup> Нека је S површина попречног пресека једног дела упадног тока Сунчеве светлости (Сл. 6).  $S_1, S_2, S_3$  и  $S_4$  су површине на тлу на које се S распореди у положајима Земље 1, 2, 3 и 4 респективно са Сл. 5. Очигледно је  $S_1$  најмање, а  $S_3$  највеће, што значи да се у положају 1 иста количина топлоте концентрише на најмању површину, а у положају 3 на највећу, а што даље значи да се у положају 1 на јединицу површине може распоредити највише топлоте, а у положају 3 најмање.



Слика 5: Годишња доба на северној Земљиној полулопти.  $G_N$  и  $G_S$  су северни и јужни географски пол респективно. Стрелице показују смер кретања Земље око Сунца.



Слика 6: Уг Фус. 4.

хоризонтом. Из та два разлога тада је загревање северне полулопте највеће и време је најтоплије.

Супротно, у положају 3 Земља се налази на дан зимске краткодневнице. Тада (и око тог положаја) Сунчеви зраци директно осветљавају јужну Земљину полулопту, а северну знатно мање, тј. падају под малим углом на њу. То значи да на јединицу површине северне Земљине полулопте пада мања количина топлоте (Фус. 4). Истовремено, како се види са Сл. 4, тада су обданице најкраће, тј. Сунце проводи најмање времена над хоризонтом. Из та два разлога тада је загревање северне полулопте најмање и време је најхладније.

У положајима 2 и 4 Сунце се налази на дан јесење, одн. пролећне равнодневнице респективно. Тада (и око тих положаја) Сунчеви зраци приближно подједнако осветљавају и северну и јужну Земљину полулопту, тј. падају под умереним углом на тло. То значи да на јединицу површине и северне и јужне Земљине полулопте пада умерена количина топлоте (Фус. 4). Истовремено, како се види са Сл. 4, тада су обданице и ноћи приближно исте дужине, тј. Сунчев боравак над хоризонтом умерено траје. Из та два разлога загревање и северне и јужне полулопте је умерено и стога је тада и време умерено.

Када је на северној Земљиној полулопти дугодневница на јужној је краткодневница и обрнуто, а када је на северној пролећна равнодневница на јужној је јесења равнодневница и обрнуто. Због тога су и временске прилике на две полулопте међусобно супротне.

Делови године ограничени тренуцима проласака Сунца кроз равнодневничке, дугодневничку и краткодневничку тачку називају се **годишњим добима**. Како је број поменутих тачака четири то је и број годишњих доба четири. Годишње доба које почиње проласком Сунца кроз тачку пролећне равнодневнице, а завршава његовим проласком кроз тачку летње дугодневнице назива се **пролеће**. Оно које почиње проласком кроз тачку летње дугодневнице, а завршава проласком кроз тачку јесење равнодневнице назива се **лето**. Оно које почиње проласком кроз тачку јесење равнодневнице, а завршава проласком кроз тачку зимске краткодневнице назива се **јесен**. И најзад, оно које почиње проласком кроз тачку зимске краткодневнице, а завршава проласком кроз тачку пролећне равнодневнице назива се **зима**.

На јужној полулопти је увек супротно годишње доба од онога на северној.

Смена годишњих доба, тј. смена општих временских прилика током године, је трећа последица привидног годишњег кретања Сунца.

Питање за Вас: када оса Земљине ротације не би била нагнута у односу на раван Земљине путање око Сунца да ли би постојала годишња доба?

Као четврту последицу привидног Сунчевог годишњег кретања наведимо промену видљивости звезданог неба током године. Како је објашњено у Лекцији 1, расејање Сунчеве светлости на честицама у Земљиној атмосфери ствара дневну светлост, у којој се „губе“ сва небеска тела осим Сунца и Месеца. Дакле, звезде (и други космички објекти) на оном делу небеске сфере који је дању изнад хоризонта из тог разлога су невидљиве и потребно је сачекати да се Сунце у свом привидном годишњем кретању помери из тог дела неба како би оне постале видљиве, тј. биле изнад хоризонта ноћу. Због тога се из неког места у различита доба године виде различити делови звезданог неба. Пролећно, летње, јесење и зимско небо (Лекција 1) се редом најбоље<sup>5</sup> виде око пролећне равнодневнице, летње дугодневнице, јесење равнодневнице и зимске краткодневнице (отуда и називи овим деловима неба). Прецизније, пролећно небо се најбоље види током друге половине зиме и прве половине пролећа, летње током друге половине пролећа и прве половине лета, јесење током друге половине лета и прве половине јесени и зимско током друге половине јесени и прве половине зиме.

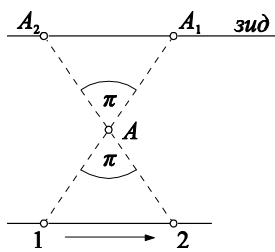
Питање за Вас: да ли нагиб осе Земљине ротације има везе са променом изгледа звезданог неба током године?

### Годишња звездана паралакса

Као један од доказа за Земљину револуцију поменућемо годишњу звездану паралаксу.

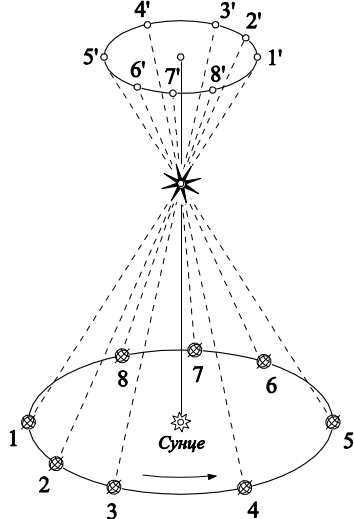
Нека се у тачки  $A$  на Сл. 7 налази неки предмет. Посматрач у положају 1 тај предмет види пројектован на зид у позадини у тачки  $A_1$ . Када се посматрач помери у положај 2 предмет ће видети пројектован на зид у тачки  $A_2$ . Дакле, као последица кретања посматрача у односу на предмет тај предмет се привидно помера. Угао  $\pi$  између праваца ка положајима  $A_1$  и  $A_2$  или, што је исто због

<sup>5</sup> Под речју „најбоље“ овде подразумевамо то да се ови делови неба у поменуто доба године могу видети током сваке ноћи у потпуности (или приближно томе).

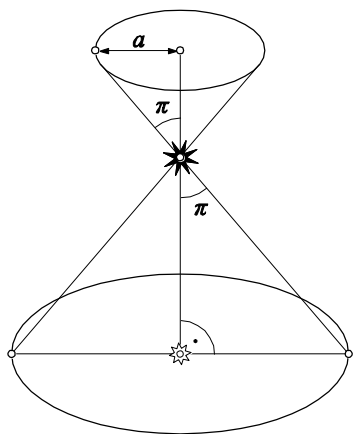


Слика 7: Појам паралаксе.

жају  $1'$  на небеској сфери, ка да је Земља у 2 звезда је у  $2'$



због унакрсности углова, Слика 8: Привидно кретање под којим би се са звезде звезда као последица Земљине револуције.



Слика 9: Појам годишње звездане паралаксе.

звезду 61 Cyg и Штруфеу (Friedrich Georg Wilhelm Struve, 1793–1864) за  $\alpha$  Lyr и Шкоту Хендерсону (Thomas Henderson, 1798–1844) за  $\alpha$  Cen<sup>6</sup>.

Питање за Вас: зашто привидно годишње кретање Сунца није доказ Земљине револуције, а постојање годишње паралаксе звезда јесте?

унакрсности углова, између праваца ка 1 и 2, са теменом у предмету  $A$ , назива се паралакса.

Како се Земља креће око Сунца, то се она истовремено креће и у односу на друге звезде, па би услед тог кретања звезде требало да мењају своје положаје на небу, као што приказује Сл. 8. Када је Земља у положају 1 на својој путањи звезда се налази у положају  $1'$  на небеској сфери, ка да је Земља у 2 звезда је у  $2'$  итд. Пошто је Земљина путања око Сунца скоро кружна и пошто правац звезда – Сунце у општем случају стоји нагнут у односу на раван Земљине путање око Сунца, то ће путања звезде на небу бити елипса (чија спљоштеност зависи од угла нагиба праваца звезда – Сунце према равни Земљине путање око Сунца). Угао  $\pi$ , под којим се са Земље види велика полуоса  $a$  те елипсе (Сл. 9), одн, што је исто

видео полупречник Земљине путање око Сунца, назива се **годишњом паралаксом** те звезде (годишњом због периода за који звезда „опише“ елипсу на небу, а који је једнак периоду Земљине револуције).

Уколико би овакво кретање звезда по небеској сфери било уочено то би био очигледан доказ да се Земља креће око Сунца. И заиста, такво кретање звезда је уочено. Први пут то је пошло за руком скоро истовремено, крајем тридесетих година XIX века, тројици астронома: Немцима Беслу (Friedrich Wilhelm Bessel, 1784–1846) за

<sup>6</sup> Први пут је Земљина револуција доказана више од једног века раније али на други начин, али то превазилази оквире овога курса.