

SVI VENERINI PROLAZI

Darije Maričić, dip. ing.

Prolazak planeta ispred Sunčeve ploče (tranzit) vrlo je rijetka pojava. Sa Zemlje možemo vidjeti jedino tranzite donjih planeta Sunčevog sustava – Merkura i Venere. U prosjeku u jednom stoljeću dogodi se 13 tranzita Merkura, dok tranziti Venere dolaze u paru (dva s razmakom od osam godina), gdje više od jedno stoljeće razdvaja dva para. Niti jedna današnja živa osoba nije vidjela tranzit Venere, jer se zadnji dogodio davne 1882. godine. Ova činjenica će se promijeniti u utorak, 8. lipnja ove godine, kada će Venera proći ispred Sunca. Potpuni događaj biti će vidljiv iz Europe, Afrike i Azije, dok će Japan, Indonezija i Filipini biti svjedoci početka tranzita, ali će im Sunce zaći prije nego što tranzit završi. Slično, s područja zapadne Afrike, sjeverno-istočne Amerike, Kariba i velikog dijela Južne Amerike moći će se opažati kraj tranzita za vrijeme izlaska Sunca.

U načelu tranzit je karakteriziran kontaktima, slično kao kod pomrčine Sunca uzrokovane Mjesecom. Tranzit započinje *prvim kontaktom (I)*, kada ploča planeta dodirne Sunčevu ploču. Kratko nakon *kontakta I*, planet možemo vidjeti kao mali luk na rubu Sunčeve ploče. Cijelu ploču planeta na Sunčevoj ploči vidimo u trenutku *kontakta II*, kada planet svojim “drugim rubom” dodiruje Sunčevu ploču. U nekoliko sljedećih sati planet putuje po sjajnoj Sunčevoj ploči. *Kontakt III* naziva se trenutak kada planet dodirne suprotnu stranu Sunčeva ruba, a *kontakt IV* ili kraj tranzita je trenutak kada planet ima svoj zadnji prividni dodir sa Sunčevom pločom prije njena napuštanja. Kontakti I i II definiraju fazu tranzita

koja se naziva ulazak, dok su kontakti III i IV vezan uz fazu izlaska. Pozicijski kut Venere za vrijeme bilo kojeg kontakta mjeri se obrnuto od smjera kazaljke na satu i od najsjevernije točke Sunčeve ploče.

Najveći tranzit nazivamo trenutak kada je Venera najbliže središtu Sunčeve ploče (minimalna razmaknutost). Za ovogodišnjeg tranzita Venerina minimalna razmaknutost od središta Sunčeve ploče iznositi će 627 lučnih sekundi.

Geocentrične faze Venerinog tranzita 2004. godine:

događaj	vrijeme (UT)
Kontakt I	05:13:29
Kontakt II	05:32:55
Maksimum	08:19:44
Kontakt III	11:06:33
Kontakt IV	11:25:59

Naznačimo da su vremena navedena u tablici za opažača na središtu Zemlje. Stvarna vremena kontakta za bilo kojeg opažača, razlikuju se najviše za ± 7 minuta. Za opažača u Hrvatskoj dana su u prethodnom članku.

Povijest tranzita

Kada je 1627. godine Johannes Kepler objavio *Rudolfinske Tablice* za gibanja planeta, omogućio je astronomima precizno predviđanje budućih položaja planeta. Na svoje vlastito iznenađenje Kepler je izračunao da će oba donja planeta (Merkur i Venera), pod kraj 1631. godine proći ispred Sunčeve ploče. Kepler nije doživio taj tranzit, ali je zato francuski astronom Pierre Gassendi prvi postao svjedokom Merkurova tranzita. Narednih mjeseci pokušao je opaziti i tranzit Venere ali nije uspio, iz razloga jer tranzit nije bio vidljiv iz Europe. Iako su Keplerova predviđanja sugerirala da se sljedeći tranzit Venere neće pojaviti prije sljedećeg stoljeća,

Paralaksa – razlika u prividnom smjeru (položaju) objekta gledano iz različitih položaja; isto što i kut s vrhom u objektu između pravaca koji povezuju dva različita položaja motritelja.

mladi i ambiciozni britanski astronom Jeremiah Horrocks bio je uvjeren da će se sljedeći tranzit dogoditi 1639. godine. Svoje proračune dovršio je samo mjesec dana prije tranzita pa nije imao dosta vremena da obavijesti ostale motritelje. Tako su Horrocks i njegov prijatelj William Crabtree bili jedini svjedoci Venerinog tranzita 4. prosinca 1639. godine. Tranzit je omogućio da točnije odrede promjer planeta. Na nesreću oba astronoma Horrocks i Crabtree umrli su premladi ne iskoristivši svoj potpuni potencijal. Evo što je *Jeremiah Horrocks* napisao o tranzitu 1639. godine:

“Pozorno sam motrio od izlaska Sunca do 9 sati, zatim malo prije deset do podneva, a u jedan poslije podne otišao sam zbog posla veće važnosti, kojeg niti zbog ove divne potrage nisam mogao zanemariti. Ali i dosad, u toku cijelog ovog vremena, nisam vidio ništa osim malih i uobičajenih pjega, koje su se sastojale od tri točke, a nalazile su se u smjeru od centra prema lijevo. Te pjege motrio sam nekoliko prethodnih i sljedećih dana. Ove pojave na Suncu nisu imale ništa u vezi s Venerom. Oko tri sata i petnaest minuta poslije podne kada sam bio slobodan opet nastaviti istraživanje, oblaci, kao proročansko miješanje odjednom su se raspršili, i ja sam se osjećao pozvanim da nastavim motriti. Malo poslije ugledao sam najugodniju predstavu, objekt kakav sam želio vidjeti, odnosno pjega neuobičajene veličine i savršeno kružnog oblika, koja se već u potpunosti nalazila na lijevoj strani Sunčeve ploče tako da su se rubovi Sunca i Venere u potpunosti poklapali. Bez sumnje, to je bila sjena planeta i marljivo sam je promatrao dok nije nestala s usijane Sunčeve ploče.”

James Gregory (1638. – 1675.), jedan od najznačajnijih matematičara 17. stoljeća, predložio je 1663. godine da se znatno preciznije mjerenje udaljenosti od Zemlje do Sunca može



Edmond Halley u mladim danima, jedan od najvećih umova u povijesti astronomije.



Jeremiah Horrocks motri tranzit Venere 1639., kojeg je predvidio svojom genijalnošću.

provesti pomoću tranzita Venere. Gotovo četrdeset godina poslije, 1677. godine, mladi Edmond Halley, koji je upravo završavao katalog zvijezda južnog neba na otočju Sveta Helena, opažao je tranzit Merkura. Halley je također zaključio da se precizno određeno vrijeme trajanja tranzita može upotrijebiti za određivanje udaljenosti Zemlje i Sunca. Tehnika je ostvariva opažanjima koja bi se provela iz različitih dijelova svijeta. Učinak paralakse uzajamno udaljenim opažачima omogućio je precizno računanje udaljenosti svih tijela u Sunčevom sustavu. Tranzit Venere je u tu svrhu pogodniji od tranzita Merkura jer je Venera bliža Zemlji i stoga ima veću paralaksu.

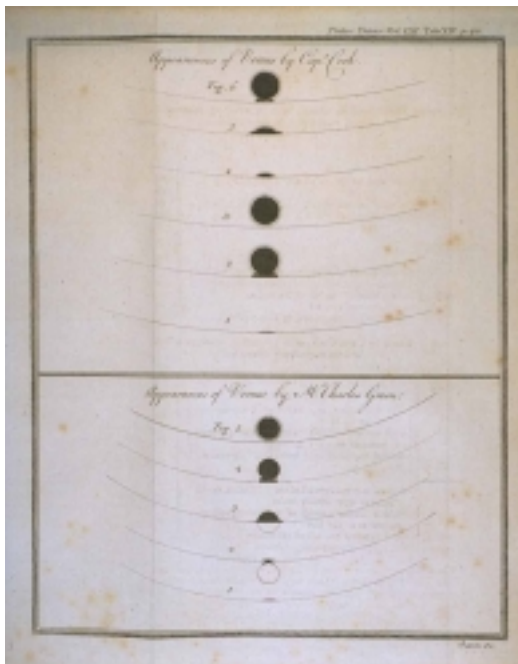
Halley je nadahnuo buduće generacije koje su organizirale brojne ekspedicije u najudaljenije dijelove svijeta radi opažanja nastupajućih tranzita Venere, koji su se dogodili 1761. i 1769. godine. Veliki broj ekspedicija koje su bile organizirane vratio se s razočaravajućim rezultatima. Precizno mjerenje vremena tranzita nije bilo moguće zbog misterioznog efekta “tamne kapljice”, koji se očituje u tome da se ploča Venere pojavljuje deformirana i nejasno priljubljena na rub Sunca. Moderna istraživanja pokazala su da je efekt “tamne kapljice” posljedica turbulencija u Zemljinjnoj atmosferi i da mu doprinosi atmosfera Venere te difrakcijski učinci u teleskopu.

Tijekom tranzita 5. lipnja 1761., kojeg je opažalo 176 znanstvenika sa 117 opservatorija iz cijelog

POVIJEST VENERINIH PROLAZA

svijeta, ruski astronom Mihail V. Lomonosov (1711.-1765.) otkrio je vrlo čudnu pojavu. Uz jako crnu Venerinu ploču koja prividno klizi po usijanoj ploči Sunca, Venera ima prelijepi svjetlosni halo oko svog tamnog ruba. Lomonosov je zaključio da se upravo to može očekivati ukoliko Venera ima atmosferu. Rano otkriće Venerine atmosfere inspiriralo je astronome da za vrijeme sljedećih tranzita koriste tehnike kao što je spektroskopija i da ustanove kemijsku građu Venerine atmosfere. Međutim, svi zaključci su bili krivi. Neki su čak izmjerili postojanje velikih količina vode u atmosferi Venere.

Sljedeći Venerin tranzit 1769. bio je u znaku velikog putovanja Jamesa Cooka koje je trajalo od 1768. do 1770. godine. Glavni cilj putovanja bio je naravno potraga za velikim južnim kontinentom, ali također i motrenje tranzita



Cookov zapis u kojemu opisuje prvi i drugi kontakt Venere za tranzita 1769. godine, naznačujući da je efekt "tamne kapljice" odgovoran za pogrešku u određivanju vremena kontakata.

Venere s otočja Tahiti u Tihom oceanu. Opažanje tranzita s Tahitija, prema Halley-u pomoglo bi u točnijem određivanju iznosa Sunčeve paralakse, odnosno udaljenosti od Zemlje do Sunca. Cookovo putovanje organizirala je britansko Kraljevsko društvo uz pomoć Kraljevskog opservatorija Greenwich. Za putovanje je izabran brod za prijevoz ugljena, koji je obnovljen i nazvan "Endeavour", a dvojicu astronoma na brodu predstavljali su kapetan James Cook i Charles Green.

Cook se rodio 1728. godine i bio je iskusni mornar sa solidnim znanjem nautičke astronomije i kartiranja obala. Čak je 1766. godine promatrao pomrčinu Sunca s Newfoundlenda u Kanadi. Green je bio šest godina Cookov pomoćnik, a također i bivši asistent Kraljevskog opservatorija Greenwich. Opažao je tranzit Venere 1761. godine, a 1763. godine ponio je sa sobom Harrisonov kronometar na put do Barbadosa. Cook i Green bili su dobro opremljeni astronomskim instrumentima. Imali su Gregorijanski reflektirajući teleskop, astronomski kvadrant i sekstant, te razne vrste ura. Ekspedicija je na vrijeme stigla do Tahitija, napravivši utvrdu "Venera" na posebnoj točki, tako da su bili sigurni da neće biti nikakvih smetnji na dan tranzita (3. lipnja 1769.). Napravili su i još dva privremena promatračka mjesta na drugim dijelovima otoka. Evo što je Cook napisao u svom izvješću:



Na karti je prikazan put kojim je Cook sa svojom posadom plovio od Australije do Južne Amerike. Otprilike u sredini karte nalazi se otočje Tahiti s kojega su motrili tranzit Venere 1769. godine.



James Cook skicirao je otoke Tahitija (lijevi crtež). Označena je i pozicija s koje je opažan tranzit Venere - Point Venus . Na snimci vidimo otočje Tahiti snimljeno iz zraka.

“Ovaj dan omogućuje nam izvanrednu priliku kakvu smo i željeli. Niti jedan oblak nismo vidjeli cijeli dan, a zrak je savršeno čist tako da imamo svaku prednost koju smo mogli poželjeti za opažanje prolaska planeta Venere ispred Sunčeve ploče. Vrlo smo jasno vidjeli atmosferu ili mutnu sjenu oko planeta, koja je jako ometala određivanje vremena kontakata, naročito dva unutarnja. Dr. Solander je motrio, kao i Mr. Green i moja malenkost, a opažena vremena kontakata se razlikuju više nego što smo očekivali”

Tranzit je trajao oko šest sati, a niti Cook, niti Green nisu uspjeli precizno izmjeriti vrijeme drugog ulaznog i prvog izlaznog kontakta. Cook je efekt “tamne kapljice” objasnio na sljedeći način: *“Vrlo je teško precizno odrediti vremena unutarnjih kontakata tijela Venere, iz razloga jer tamna polusjena (tj. atmosfera Venere) na Sunčevoj ploči postaje skoro toliko tamna koliko je taman i planet. U ovom trenutku slaba svjetlost skuplja se otprilike prema točki kontakta.”* Problem je bio u tome što se nisu mogli odlučiti kada se točno Venera odvaja od Sunčeva ruba. Međutim, čak i s ovakvom pogreškom, mjerenja tranzita Venere s Tahitija predstavljala su najvrijedniji podatak za precizno određivanje udaljenosti Zemlje do Sunca.

Velika svjetska opažačka akcija pokrenuta je prigodom tranzita Venere 8. prosinca 1874. i 6. prosinca 1882. godine. Na stotine fotografa snimalo je tranzite, primjenjujući tako nove tehnologije opažanja. Popularnost tranzita bila je ogromna. Tranzit Venere bio je na svim naslovnim stranicama značajnih novina tog doba,

a i vlade raznih država izdvajale su značajna sredstva za financiranje ekspedicija. O tranzitu iz 1882. godine imamo veliki broj podataka, od kojih je dio upotrebljen za proračun udaljenosti Zemlja-Sunce. Svega nekoliko astronoma proveli su složene račune. U tome su prednjačili Simon Newcomb i William Harkness.

- Simon Newcomb – objavio je 1891. godine svoju najbolje određenu vrijednost paralakse koja je izvedena iz podataka opažanja tranzita. Dobivena vrijednost paralakse iznosila je $8,80 \pm 0,051''$, a udaljenost Zemlje do Sunca $148.323.200 \pm 85.920$ km.

- William Harkness - direktor Naval opservatorija, dobio je nešto veću vrijednost za paralaksu, $8,809 \pm 0,0059''$, iz koje se dobije udaljenost od $148.475.200 \pm 95.520$ km. Njegovi rezultati nisu bili javno objavljeni u znanstvenim časopisima.

Međunarodna znanstvena udruga prihvatila je tek 1896. godine Newcombovu vrijednost, a također i Harkness-ovu (razlika između dvije vrijednosti statistički gledano iznosi samo 152.000 km), kao novu vrijednost za jednu astronomsku jedinicu (1 a.j.) koja je definirana kao srednja udaljenost Zemlje d Sunca. Jedan od najljepših komentara vezan uz tranzit iz 1882. godine, a i uz sljedeći u 2004. godine, dao je William Harkness :

“Trenutno smo u noći prije drugog tranzita od para, poslije kojeg neće biti tranzita sve do dvadeset prvog stoljeća, kad novo doba bude svanulo na Zemlji, a lipanjsko lišće procvjeta u 2004. godini. Tijekom posljednjeg tranzita, intelektualni svijet se “probudio” od mračnih

godina i upravo je započela prediva znanstvena aktivnost koja je dovela do sadašnjeg naprednog znanja. Kako će izgledati znanost, kada sljedeći tranzit dođe – Bog jedino zna. Čak niti naša djeca neće doživjeti toliko da ponesu sa sobom dio astronomije ovog doba...”

Godine 1931. britanski astronom Harold Spencer Jones, mjereći paralaksu planetoida Eros koji se približio Zemlji, uspio je još preciznije odrediti iznos jedne astronomske jedinice (1 a.j. = 148.163.600 km). Udaljenost do Sunca i planeta danas se može vrlo precizno odrediti upotrebom radarskog signala. Iz tog aspekta ovogodišnji tranzit neće biti toliko od znanstvenog značaja kao prošli tranziti. Trenutna precizna vrijednost jedne

astronomske jedinice iznosi 149.597.892,3 kilometara s pogreškom od 1,5km.

Učestalost tranzita

Staza Venere nagnuta je za $3,4^\circ$ u odnosu na Zemljinu stazu (ekliptiku). Ona presijeca ravninu ekliptike u dvije točke ili dva čvora. Nazivamo ih silazni, odnosno uzlazni s obzirom na smjer gibanja Venere. Venera kroz čvorove prolazi svake godine i to početkom lipnja i prosinca. Ukoliko se dogodi da se Venera prilikom prolaska kroz čvor nalazi i u donjoj konjunktiji, može doći do pojave tranzita. Venerin period obilaska oko Sunca iznosi samo 224,7 dana, dok njen sinodički

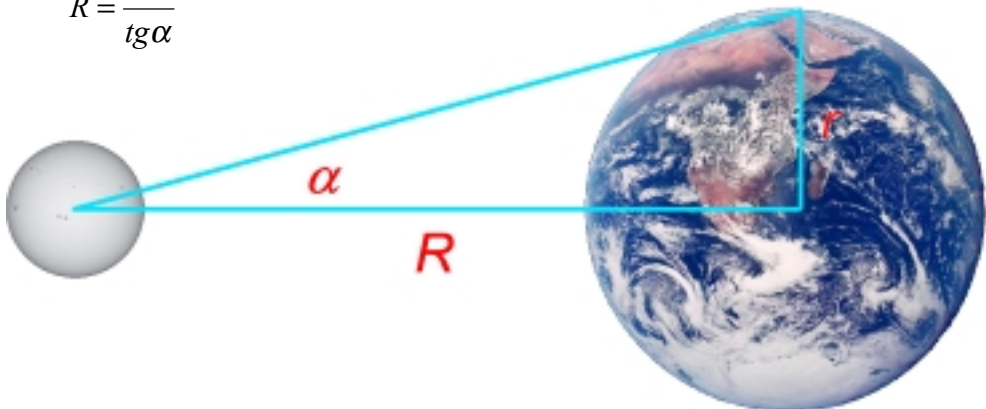
Što je konjunktija, tranzit i Sunčeva paralaksa

Prema položaju staze planeta prema Zemljinoj stazi, planete dijelimo na tzv. *donje* i *gornje*. Nazivi *unutarnji* i *vanjski* upotrebljavaju se za *terestričke* i *jovijanske* planete (u ovom slučaju podjela je u odnosu na asteroidni pojas). Donji planeti (Merkur i Venera) nalaze se unutar Zemljine staze, pa se na nebu nikada ne udaljavaju previše od Sunca, zbog čega ih možemo vidjeti samo u sumrak ili u zoru.

Konjunktija je pojava kada se neki planet nalazi približno u pravcu Sunca. Donji planeti mogu biti iza Sunca (*gornja konjunktija*) ili ispred (*donja konjunktija*) Sunca. Dakle, prolazak Merkura ili Venere ispred Sunca, ili tzv. tranzit, događa se za *donje konjunktije*. Zbog činjenica da su staze planeta nagnute prema ekliptici, planet neće u svakoj svojoj donjoj konjunktiji proći ispred Sunčeve ploče, već sjeverno ili južno od nje.

Pod *Sunčevom paralaksom* podrazumijevamo kut α (vidjeti priloženi crtež) pod kojim se okomito vidi (ekvatorski) polumjer Zemlje sa Sunčeve udaljenosti (odnosno udaljenosti od jedne astronomske jedinice). Dakle, znamo li vrijednost Zemljina polumjera (r) i vrijednost Sunčeve paralakse (α), možemo odrediti udaljenost između Sunca i Zemlje (R), pomoću izraza

$$R = \frac{r}{\operatorname{tg}\alpha}$$



POVIJEST VENERINIH PROLAZA

period (npr. od konjunkcije do konjunkcije) iznosi 583,9 dana. Zbog nagiba Venerine orbite u odnosu na Zemljinu, većina unutarnjih konjunkcija Venere kao posljedica nema tranzit, jer planet prolazi previsoko ili prenisko od ekliptike. Od izuma teleskopa 1610. godine, bilo je samo šest tranzita Venere. Koliko je tranzit rijetka pojava govori nam podatak da se u periodu od 6000 godina, tj. od 2000. godine prije Krista do 4000. godine poslije Krista, dogodio svega 81 tranzit Venere.

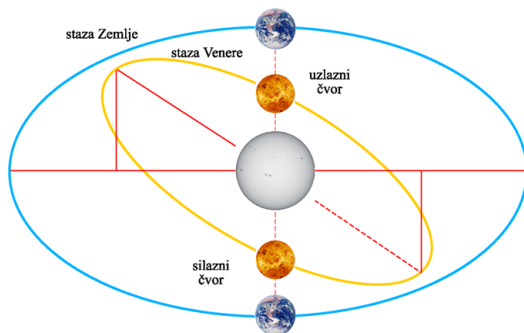
Tranzit Venere 6. prosinca. 1631. godine, kojeg je predvidio Kepler, nije bio vidljiv iz Europe, ali već 8 godina kasnije, 4. prosinca 1639. godine, Horrocks i Crabtree bili su prvi svjedoci Venerinog tranzita. Sljedeći tranzit se dogodio 121,5 godina kasnije, u lipnju 1761. godine; sljedeći u paru (opet poslije 8 godina) bio je u lipnju 1769. godine. Nakon 105,5 godina, u prosincu 1874. godine slijedio je opet prvi od para prolaza u razmaku od 8 godina. Iz podataka o tranzitima, astronomi su zaključili da se u jednom ciklusu od 243 godine dogode četiri tranzita Venere, te da se ponavljaju u intervalima od 8; 105,5; 8 i 121,5 godina.

Dakle:

8 godina + 105,5 god + 8 godina + 121,5 godina = 243 godine

Tranziti Venere od 1601. do 2200. godine

datum	trenutak maksimuma tranzita (UT)
07. prosinac 1631.	05:19
04. prosinac 1639.	18:26
06. lipanj 1761.	05:19
03. lipanj 1769.	22:25
09. prosinac 1874.	04:07
06. prosinac 1882.	17:06
08. lipanj 2004.	08:20
06. lipanj 2012.	01:28
11. prosinac 2117.	02:48
08. prosinac 2125.	16:01



Prikaz položaja Zemlje, Venere i Sunca, kada se Venera nalazi u uzlaznom i silaznom čvoru u trenucima kada je moguć tranzit.

Uvjet tranzita je da se Venera u donjoj konjunkciji nađe dovoljno blizu jednom od dvaju čvorova svoje staze.

Da bi objasnili nastupanje tranzita unutar razdoblja od 243 godine, iz praktičnih razloga dobro je započeti s jednom konkretnom konjunkcijom, npr. onom 7. prosinca 1631. godine, kada se Venera nalazila dovoljno blizu svog uzlaznog čvora (tako da se dogodio tranzit).

Nakon 5 sinodičkih okreta, Venera zaostaje 2,46 dana za položajem koji zauzima 8 godina nakon svog početnog položaja:

$$\begin{aligned} 8 \times 365,256 \text{ dana} &= 2922,048 \text{ dana} \\ 5 \times 583,917 \text{ dana} &= 2919,585 \text{ dana} \\ \text{razlika} & 2,46 \text{ dana} \end{aligned}$$

U ovom položaju, 8 godina nakon tranzita 1631. godine, tj. 4. prosinca 1639. godine, događa se još jedan tranzit, pri čemu se staza Venere premješta na ploči Sunca za određeni kut. Kut za koji se u 8 godina premjesti put Venere na Sunčevoj ploči, dobiva se iz elemenata Venerine staze:

- srednja udaljenost od Sunca 0,72 a.j.
- period revolucije 224,70 dana
- sinodički period 583,9 dana
- inklinacija 3,39°
- srednja brzina u stazi 35 km/s

POVIJEST VENERINIH PROLAZA

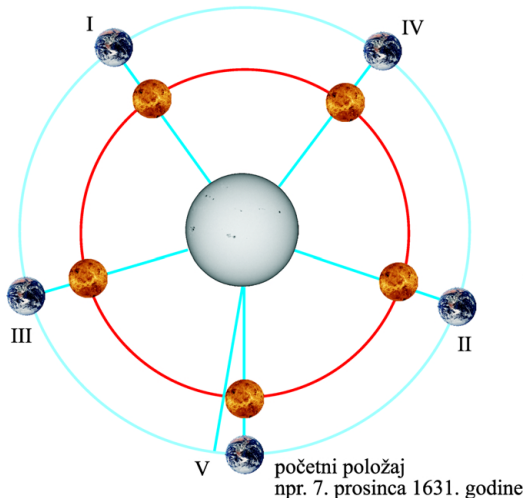
Jednaki dio puta kojeg Zemlja prevoli u 2,46 dana, brža Venera prevoli u 1,51 dan. Ovaj dio predstavlja $1,51/224,7 = 0,00674$ dio perioda revolucije. Opseg Venerine staze je $2 \times p \times 0,72$ a.j. = 4,52 a.j., pa je udaljenost Venere (s) od njena položaja prije 8 godina jednaka $s = 0,00674 \times 4,52$ a.j. = 0,0305 a.j.

Iz inklinacije Venerine staze, možemo odrediti kolika je to udaljenost gledana okomito na ravninu ekliptike:

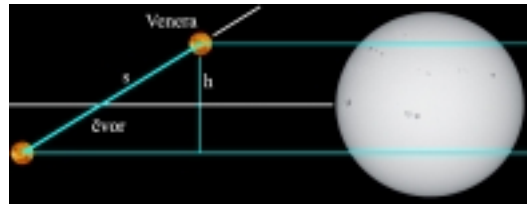
$$h = 0,0305 \sin(3,39^\circ) \text{ a.j.} = 0,00180 \text{ a.j.}$$

Udaljenost h promatrač sa Zemlje vidi s udaljenosti od 0,28 a.j., tj. pod kutom od oko 22° . Dakle, za ovaj kut se pomakne Venerin put na Sunčevoj ploči promjera $32'$.

U narednih 8 godina put Venere opet se pomakne za daljnjih $22'$ i prolazi pored Sunčeve ploče, pa stoga nisu moguća više od 2 tranzita u razmaku od 8 godina, već tek nakon 121,5 godina (što odgovara periodu od 76 sinodičkih revolucija).



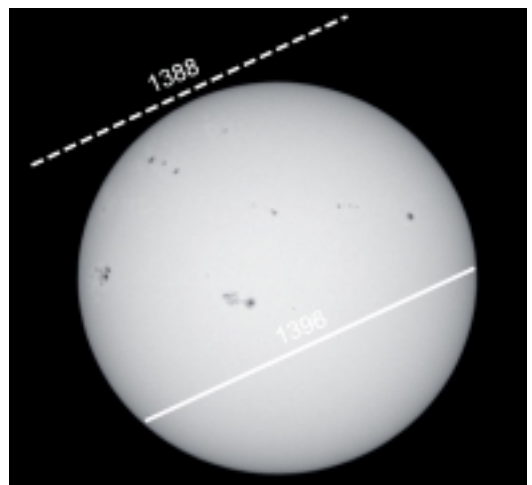
Brojke na slici pokazuju položaje Venere i Zemlje kod I, II, III, IV i V-og sinodičkog okreta. Sinodički period revolucije donjeg planeta definiramo kao srednji interval između dvije uzastopne konjunkcije (bilo donje ili gornje).



Slikovito prikazana promjena položaja Venere nakon 8 godina (između dva tranzita u paru).

Venera za to vrijeme napravi 197,5 ophoda i slijedeći put se nalazi blizu čvora staze 6. lipnja 1761. godine, a osam godina kasnije, 3. lipnja 1769. godine ispunjeni su preduvjeti za još jedan tranzit. Potom tek nakon 66 daljnjih sinodičkih rotacija (tj. nakon 105,5 godina i 171,5 ophoda Venere) ciklus je završen, a tranzit Venere je 9. prosinca 1874. godine.

Moguće je i da dođe do takozvanog *izdvojenog* (izoliranog) tranzita. Naime, ukoliko se dogodi tranzit da Venera prolazi manje od $10'$ od središta Sunčeve ploče, 8 godina kasnije (ili ranije) Venera prolazi vrlo blizu ruba Sunčeve ploče pa se tranzit ne događa. Zadnji takav izdvojeni tranzit bio je 1396. godine.



Zamišljeni prikaz Sunca i izdvojenog tranzita Venere 1369. godine.