

## Uticaj atmosfere i površine planete na njenu nastanjivost

---

*Ovaj rad se bavi ispitivanjem uticaja koeficijenta apsorpcije atmosfere i albeda površine planete na postojanje tečne vode, uzimajući u obzir karakteristike planete i evoluciju matične zvezde. Korišćeni su podaci za tri zvezde slične Suncu u pogledu mase i metaličnosti. Dobijeni rezultati sugerišu da povećanje vrednosti albeda utiče na povećanje relativne promene širine nastanjive zone. Povećanje koeficijenta apsorpcije povećava ili smanjuje relativnu promenu širine nastanjive zone u zavisnosti od albeda. Zaključeno je da albedo ima veći uticaj na položaje i širine nastanjivih zona od koeficijenta apsorpcije atmosfere.*

---

### Uvod

S obzirom na to da se otkriva sve više ekstrasolarnih planeta, sve je veći broj ispitivanja da li su uslovi na njima pogodni za postojanje života, odnosno, da li su pomenute planete nastanjive. Nastanjivost planete zavisi od brojnih faktora (hemijskog sastava atmosfere i tla, pritiska, temperature na planeti, prisustva organskih materija i tečne vode, Homeck i Rettberg 2013). Imajući u vidu da je poznata forma života jedino ona bazirana na ugljenikovim jedinjenjima, definicija nastanjivosti se odnosi na uslove u kojima oblici zemaljskog života mogu opstati.

Voda u tečnom stanju je jedan od osnovnih činilaca života na Zemlji, što znači da temperatura vode na planeti mora biti između 273 K i 373 K. U astrobiološkim istraživanjima se, kao potreban uslov nastanjivosti smatra prisustvo

vode u tečnom stanju. Opseg udaljenosti od matične zvezde na kojima je temperatura apsolutno crnog tela (nadalje ACT) između 273 K i 373 K, smatra se cirkumstelarnom nastanjivom zonom. ACT predstavlja teorijski objekat koji apsorbuje sve zračenje koje dospe na njegovu površinu i emituje zračenje iste snage sa svoje površine. Za ACT se smatra da je u termodinamičkoj ravnoteži. Cirkumstelarna nastanjiva zona je vezana za karakteristike matične zvezde, jer se planeta trerira kao ACT.

Pošto je poznato da život ne može postojati bez atmosfere, ovaj rad uzima u obzir i prisustvo atmosfere na planeti. Stoga je u ovom radu nastanjiva zona definisna kao opseg udaljenosti od matične zvezde na kojima je temperatura planete (sa njenim karakteristikama) između 273 K i 373 K. U radu se razlikuju atmosferska karakteristika, odnosno, koeficijent apsorpcije atmosfere i karakteristika površine, odnosno albedo. Koeficijent apsorpcije atmosfere predstavlja odnos apsorbovane snage zračenja i snage zračenja dospele u atmosferu. Albedo predstavlja odnos reflekovane snage zračenja i ukupne snage zračenja dospele na površinu. U daljem tekstu biće razlikovane nastanjiva zona ACT, kao nastanjiva zona iz literature, i nastanjiva zona planete, kao nastanjiva zona definisana u ovom radu.

Uticaj atmosfere planete na njenu nastanjivost određivan je kroz merenje relativne promene širine nastanjive zone planete. Varirana su oba parametra modela: albedo i koeficijent apsorpcije atmosfere. U cilju obuhvatnijeg ispitivanja, uzeta je u obzir i evolucija matične zvezde.

---

*Luka Bulaja (2000), Žitište, Mladena Stojanovića 67, učenik 2. razreda Zrenjaninske gimnazije*

#### MENTORI:

*Ivana Bešlić, student master studija na Matematičkom fakultetu Univerziteta u Beogradu*

*Sanja Mihajlović, student master studija na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu*

Za njeno opisivanje korišćen je numerički model koji je za opis zvezdane evolucije koristio njenu početnu masu i metaličnost.

## Metod

Iako su planete sa atmosferom vrlo kompleksni fizički sistemi za čije je potpuno opisivanje potrebno uzeti u obzir veliki broj faktora (strujanje vazduha u atmosferi, razmenu mase u vidu atmosferskih padavina i kopnenih isparenja, razmenu toplote itd.), u ovom radu su u obzir uzete dve karakteristike planete – albedo i koeficijent apsorpcije. Karakteristike planete su konstantne tokom vremena. Korišćen je Model selektivno propustljive atmosfere (Marshall i Plumb 2008) za modelovanje sistema atmosfera-površina planete.

Model selektivno propustljive atmosfere (slika 1) sadrži nekoliko osnovnih pretpostavki: u datom vremenskom trenutku, površina planete i atmosfera planete se nalaze u termodinamičkoj ravnoteži, ali sistem površina planete – atmosfera se ne nalazi u termodinamičkoj ravnoteži, jer temperatura nije jednaka u svim delovima sistema. Smatra se da atmosfera i površina planete zrače kao ACT.

Ako se planeta kreće oko matične zvezde na udaljenosti  $r$ , tada do planete dolazi fluks:

$$\Phi_*(t) = \frac{\sigma T_Z^4 R_Z^2}{r^2}, \quad (1)$$

gde je  $R_Z$  temperatura matične zvezde, a  $R_Z$  njen poluprečnik.

Izraz (1) prikazuje koliki deo zvezdanog fluksa dolazi do planete. Jedan deo pristiglog fluksa se apsorbuje u atmosferi planete, a drugi dolazi do površine planete. Deo fluksa koji je apsorbovan u atmosferi planete zavisi od raspodele intenziteta zračenja po talasnim dužinama. Atmosfera intenzivno apsorbuje zračenje samo u dva dela spektra (web 1):  $\lambda > 700$  nm (nadalje, prvi interval) i  $\lambda < 450$  nm (drugi interval). U opsegu između 450 nm i 700 nm apsorpcija zračenja se smatra zanemarljivom. Apсорpcija atmosfere uzeta je po uzoru na Zemljinu atmosferu, jer se pretpostavlja da se život formira na planetama sličnim Zemlji. Ukoliko se sa  $\Phi_{a1}$  obeleži fluks zračenja poteklog sa zvezde koji je apsorbovan u atmosferi, sa  $\Phi_n$  fluks zvezdanog zračenja sa

prvog intervala zračenja, sa  $\Phi_v$  fluks zvezdanog zračenja sa drugog intervala, a sa  $\varepsilon$  koeficijent apsorpcije atmosfere, važi:

$$\Phi_{a1} = \varepsilon(\Phi_n + \Phi_v). \quad (2)$$

Za prvi i drugi interval zračenja uzet je isti koeficijent, jer je u Zemljinoj atmosferi apsorpcija u oba intervala približno jednaka (*ibid.*). Deo fluksa koji dolazi do površine planete tamo se delimično apsorbuje, a delimično odbija. Udeo odbijenog zračenja određen je albedom. Odbijeno zvezdano zračenje ponovo prolazi kroz atmosferu i tamo se delimično apsorbuje. Zagrevanje površine vrši samo zračenje koje nije apsorbovano od strane atmosfere ili odbijeno od strane površine, stoga se fluks apsorbovan od strane površine planete računa kao:

$$\Phi_p = (1 - \alpha) \left( 1 - \varepsilon \frac{\Phi_n + \Phi_v}{\Phi_*} \right) \cdot \Phi_*, \quad (3)$$

gde je  $\alpha$  albedo površine planete.

Površina planete zagreva atmosferu putem zračenja, jer zrači kao ACT. S obzirom na to da je temperatura površine planete daleko niža od efektivne temperature zvezde, planeta će zračiti samo u intervalu talasnih dužina većih od 700 nm. Zagrevanje površine od strane unutrašnjosti planete je zanemareno. Udeo apsorbovanog planetarnog fluksa u atmosferi je:

$$\Phi_{a2} = \varepsilon \sigma T_p^4, \quad (4)$$

gde je  $T_p$  temperatura površine planete.

Pored toga, atmosferu zagreva i zračenje koje je reflektovano od površine, a potiče sa zvezde. Udeo apsorbovanog zračenja reflektovanog o površinu se dobija:

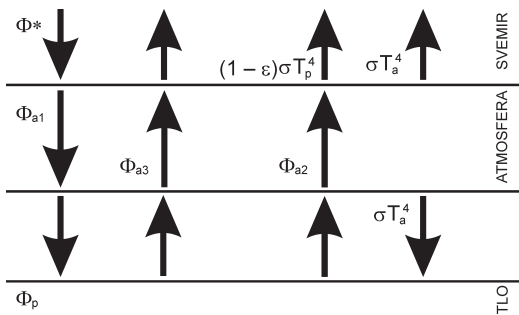
$$\Phi_{a3} = \alpha \varepsilon (\Phi_n + \Phi_v) \left( 1 - \varepsilon \frac{\Phi_n + \Phi_v}{\Phi_*} \right). \quad (5)$$

Atmosfera, zagrejana od strane zvezdanog zračenja i zračenja poteklog sa površine planete, zrači zagrevajući površinu planete dodatno. Primenom zakona održanja energije dobija se izraz:

$$\Phi_{a1} + \Phi_p + \Phi_{a3} = (1 - \varepsilon) \sigma T_p^4 + \sigma T_a^4, \quad (6)$$

gde je  $T_a$  temperatura atmosfere.

Ukupno zračenje koje zagreva površinu planete jednako je zbiru zvezdanog zračenja koje apsorbuje površina (izraz (3)) i atmosferskog zračenja koje apsorbuje površina:



Slika 1. Model selektivno propustljive atmosfere

Figure 1. The model of selectively permeable atmosphere (from top: universe, atmosphere, ground)

$$\sigma T_p^4 = (1 - \alpha) \left( 1 - \varepsilon \frac{\Phi_n + \Phi_v}{\Phi_*} \right) \Phi_* + \sigma T_a^4. \quad (7)$$

Kada se članovi na levoj strani izraza (6) zamene izrazima (2), (3) i (5), a iz izraza (7) izrazi atmosferski fluks, dolazi se do:

$$\begin{aligned} & \Phi_* \left[ \varepsilon \frac{\Phi_n + \Phi_v}{\Phi_*} + 2(1 - \alpha) \left( 1 - \varepsilon \frac{\Phi_n + \Phi_v}{\Phi_*} \right) + \right. \\ & \left. + \alpha \varepsilon \frac{\Phi_n + \Phi_v}{\Phi_*} \left( 1 - \varepsilon \frac{\Phi_n + \Phi_v}{\Phi_*} \right) \right] = \sigma T_p^4 (2 - \varepsilon). \end{aligned} \quad (8)$$

Ubacivanjem izraza (1) u izraz (8), dolazi se do izraza za udaljenost planete na kojoj njena površina ima temperaturu  $T_p$ :

$$r = \frac{T_Z R_Z}{T_p} \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon \Phi + 2(1 - \alpha)(1 - \varepsilon \Phi) + \alpha \varepsilon \Phi (1 - \varepsilon \Phi)}{2 - \varepsilon}}, \quad (9)$$

gde je  $\Phi = \frac{\Phi_n + \Phi_v}{\Phi_*}$ .

Ukoliko je temperatura površine planete 373 K, dobija se vrednost udaljenosti unutrašnje, a pri temperaturi 273 K vrednost spoljašnje granice nastanjive zone planete.

Ukoliko se od udaljenosti spoljašnje granice nastanjive zone planete (izraz (9) za  $T_p = 273$  K) oduzme udaljenost unutrašnje granice nastanjive zone planete (izraz (9) za  $T_p = 373$  K), dobija se izraz za širinu nastanjive zone planete:

$$\Delta r = b T_Z^2 R_Z \sqrt{\frac{\varepsilon \Phi + 2(1 - \varepsilon \Phi) + \alpha \varepsilon \Phi (1 - \varepsilon \Phi)}{2 - \varepsilon}}, \quad (10)$$

gde je  $b = 6.23 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-2}$ , a  $\Phi = \frac{\Phi_n + \Phi_v}{\Phi_*}$ .

Za kvantifikaciju uticaja atmosfere na nastanjivost planete korišćena je relativna promena širine nastanjive zone planete (na dalje, RPNZ):

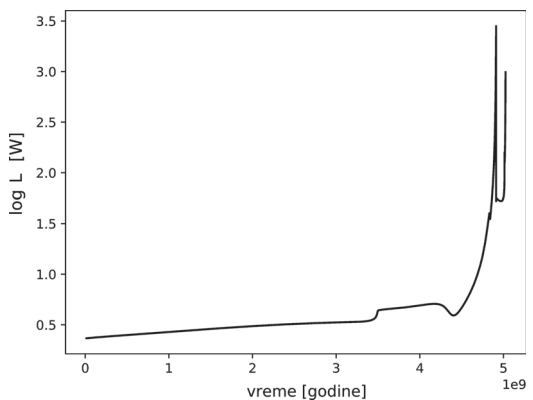
$$\Delta = \frac{\Delta r_2 - \Delta r_1}{\Delta r_1}, \quad (11)$$

gde je  $\Delta r_1$  širina nastanjive zone za planetu bez atmosfere,  $\Delta r_2$  širina nastanjive zone za planetu sa atmosferom.

## Modeli evolucije zvezda

Kako je navdano, u obzir je uzeta evolucija zvezde tokom vremena. Pomoću softvera (web 2), dobijeni su numerički podaci u formi  $T_Z = f(t)$ ,  $R_Z = f(t)$ , gde je  $t$  vreme. Evolucija zvezde zavisi od njene mase i hemijskog sastava, pa su parametri koji su odlikovali zvezdu bili njena masa i metaličnost.

U analizu su ušle jedino zvezde slične Suncu po masi i metaličnosti, jer je verovatnoća formiranja planeta sličnih Zemlji najveća oko zvezda koje su slične Suncu (Valenti 2010). Ispitivanja nastanjive zone planete vršena su samo tokom vremena kada je matična zvezda na glavnom



Slika 2. Zavisnost luminoznosti zvezde od vremena za slučaj  $M = 1.282 M_\odot$

Figure 2. The dependency of luminosity of the star from time (in years) for the case  $M = 1.282 M_\odot$

nizu na HR dijagramu, jer kada zvezde siđu sa glavnog niza nastaju nagle promene luminoznosti (slika 2). Zbog naglih promena luminoznosti nije moguće održati nastanjivost na duži vremenski interval. Dužina boravka zvezde na glavnom nizu određivana je izrazom (Hasen i Kawaler 1994):

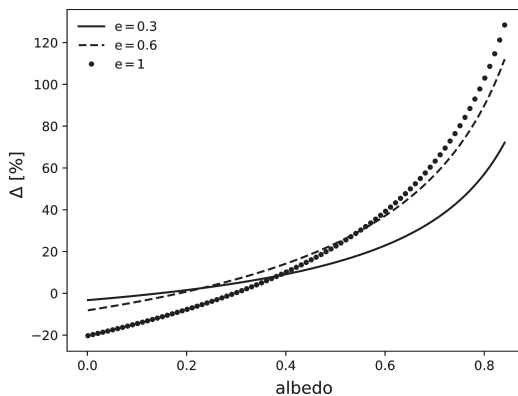
$$t_{\text{ms}} = 10^{10} (M_Z/M_{\odot})^{-2.5} \text{ godina.}$$

## Rezultati i diskusija

Razmatrana je relativna promena širine nastanjive zone planete ( $\Delta$ ) kod triju različitih zvezda sličnih Suncu. Njihove mase su  $0.931 M_{\odot}$  (donja granica mase za zvezde slične Suncu),  $1 M_{\odot}$  i  $1.282 M_{\odot}$  (gornja granica mase za zvezde slične Suncu) (Soderblom *et al.* 1998). Zbog različite mase i metaličnosti zvezda, poznato je da je period u kom će zvezda mase  $0.931 M_{\odot}$  biti na glavnom nizu oko 12 milijardi godina, za zvezdu solarne, taj period je oko 10 milijardi godina, za zvezdu mase  $1.282 M_{\odot}$  oko 3.5 milijarde godina. Razmatrale su se vrednosti albeda između 0.1 i 0.75, jer se u tom opsegu nalazi albedo vodod bogatih površina (Marshall i Plumb 2008).

Utvrđeno je da se tokom vremena,  $\Delta$  za sve tri zvezde ne menja u značajnoj meri. Iz izraza (10) se vidi da je  $\Delta$  zavisno od luminoznosti zvezde. S obzirom da se promena luminoznosti zvezda na glavnom nizu može zanemariti, i zavisnost  $\Delta$  se takođe može zanemariti. Takođe, utvrđeno je da izbor matične zvezde ne utiče na promenu  $\Delta$  za bilo koje vrednosti albeda i koeficijenta apsorpcije atmosfere.

Na slici 3 prikazana je zavisnost  $\Delta$  od albeda za tri različita koeficijenta apsorpcije. Uočljivo je da je albedo uticajniji faktor na širinu nastanjive zone planete od koeficijenta apsorpcije. Sa grafika se vidi da albedo može modifiovati širinu nastanjive zone planete za oko 100%, a koeficijent apsorpcije za oko 40%. Ovim je utvrđeno da  $\Delta$  više zavisi od albeda, nego od koeficijenta apsorpcije atmosfere. Za slučaj niskog albeda (površina apsorbuje veliki deo fluksa zračenja), sa povećanjem koeficijenta apsorpcije atmosfere  $\Delta$  opada. Do toga dolazi jer što je veći koeficijent apsorpcije, manje zračenja dolazi do površine i samim time se manje apsorbuje. Imajući to u vidu, planeta koja apsorbuje manje zračenja



Slika 3. Relativna promena širine nastanjive zone u zavisnosti od albeda za tri različita koeficijenta apsorpcije.

Figure 3. The relative change of the range of suitable distances depending on albedo for three absorption coefficients

mora biti bliža matičnoj zvezdi, a samim tim i širina nastanjive zone je manja od širine nastanjive zone planete koja apsorbuje više zračenja. Za slučaj visokog albeda (površina apsorbuje mali deo fluksa zračenja), sa povećanjem koeficijenta apsorpcije, dolazi do povećanja  $\Delta$ . Pri visokim vrednostima albeda, atmosfera postaje primarni izvor zračenja, pa je, u slučaju visokog albeda i niskog koeficijenta apsorpcije, neophodno da planeta bude blizu matične zvezde da bi bila nastanjiva.

## Zaključak

U ovom radu ispitan je uticaj atmosfere na nastanjivost planeta putem utvrđivanja relativne promene širine nastanjive zone planete. Za to je korišćen Model selektivno propustljive atmosfere (Marshall i Plumb 2008). Korišćeni model uzima u obzir apsorpciju zvezdanog zračenja i zračenja poteklog sa površine planete u atmosferi, apsorpciju zvezdanog i atmosferskog zračenja od strane površine planete. Model koristi nekoliko aproksimacija: albedo i koeficijent apsorpcije atmosfere se ne menjaju kroz vreme, zanemaruje se razmena mase između atmosfere i površine planete (padavine, isparenja), statičnost atmosfere.

Utvrđeno je da uticaj atmosfere ne zavisi od izbora matične zvezde, ukoliko je zvezda slična Suncu. Zaključuje se da uticaj atmosfere na nastanjivost planete može biti pozitivan (u slučaju povećanja širine nastanjive zone) i negativan (u slučaju smanjenja širine nastanjive zone). Povećanje koeficijenta apsorpcije smanjuje širinu nastanjive zone za slučaj niskog albeda, a povećava širinu nastanjive zone za slučaj visokog albeda. Albedo je uticajniji na širine nastanjive zone od koeficijenta apsorpcije. Svi zaključci važe nezavisno od matične zvezde i vremena.

Imajući u vidu kompleksnost atmosfere kao fizičkog sistema, ovaj rad je razmotrio samo glavne fenomene koji imaju uticaj na temperaturu sistema površina planete-atmosfera. Model selektivno propustljive atmosfere može biti nadograđen deljenjem atmosfere na veći broj međusobno integriranih slojeva. Ovaj atmosferski model bi se mogao primeniti kao polazna tačka u ispitivanju ekstrasolarnih sistema. Nadogradnja modela bi predstavljala korak ka realističnijem modelu atmosfere planete.

**Zahvalnost.** Autor se zahvaljuje menotrma, Ivani Bešlić i Sanji Mihajlović, koje su pomogle u izradi koda i teorijskog modela.

---

## Literatura

- Hansen C., Kawaler S. 1994. *Stellar Interiors: Physical Principles, Structure, and Evolution*. Springer
- Homeck G., Retberg P. 2013. *Complete Course in Astrobiology*. Vajnhajm: WILEY-VCH
- Marshall J., Plumb A. 2008. *Atmosphere, Ocean and Climate Dynamics: An Introductory Text*. Elsevier
- Majić B. 2012. Određivanje parametara ekstrasolarne planete iz krive sjaja. *Petničke sveske*, 75: 5.
- Soderblom D. R., King J. R. 1998. Solar-Type stars: Basic information on their classification and

characterization. U *Solar Analogs: Characteristics and Optimum Candidates*. Arizona: Lowell Observatory, str. 41.

Valenti J. A. 2010. Metallicity and Planet Formation – Observations. U *Proceedings of the International Astronomical Union*, 5(S265): 403-407.

Web 1:  
<http://what-when-how.com/remote-sensing-from-air-and-space/atmospheric-absorption-scattering-and-turbulence-visible-imagery-remote-sensing/>, 2017.

Web 2:  
[http://basti.oa-teramo.inaf.it/BASTI/WEB\\_TOOLS/IM\\_HTML/index.html](http://basti.oa-teramo.inaf.it/BASTI/WEB_TOOLS/IM_HTML/index.html)

---

*Luka Bulaja*

## Atmosphere and Ground Influence on a Planets' Habitability

The purpose of this paper is to research how different traits of the atmosphere can affect the conditions for the existence of liquid water, taking into consideration the evolution of the star. If the temperature of a planet's surface is somewhere between 373 K and 273 K, the planet is considered habitable. The distance range from the star, where the planet's surface has a temperature in the given range, is a range of suitable distances. We used three Sun-like stars. The results suggest that an increase of the albedo has an influence on the expansion of the relative change of the range of suitable distances. The increase of the absorption coefficient influences the expansion or the decrease of the relative change of the range of suitable distances depending on the albedo. The condition is that the albedo has a bigger influence on the positions and latitudes of the range of suitable distances from the atmosphere's absorption.

