

ATMOSFERE EKSOPLANETOV

MARIJA JUDEŽ

Fakulteta za matematiko in fiziko
Univerza v Ljubljani

Raziskovanje atmosfer planetov okoli drugih zvezd – eksoplanetov – je ena najbolj aktualnih tem današnje astronomije. V tem članku je predstavljena definicija in nastanek atmosfer, njihova obstojnost, to, kako atmosfere vplivajo na temperaturne razmere eksoplanetov ter odkrivanje sestave in lastnosti atmosfer eksoplanetov s pomočjo vesoljskega teleskopa James Webb.

EXOPLANET ATMOSPHERES

The study of the atmospheres of planets orbiting other stars – exoplanets – is one of the most active fields in modern astronomy. This article presents the definition and formation of atmospheres, their stability, how they affect the temperature conditions on exoplanets, and how the James Webb Space Telescope is used to detect the composition and properties of exoplanet atmospheres.

1. Uvod

Prvi eksoplanet so odkrili leta 1992 [1]. Od takrat se število odkritih eksoplanetov iz dneva v dan veča in danes znaša že več kot 6200 [2]. Vesoljski teleskop Kepler je odkril 2784 eksoplanetov [3] – kar je 45 % vseh znanih – in to v območju, ki predstavlja le 0,28 % celotnega neba [4]. Del neba, kjer je teleskop Kepler iskal eksoplanete, imenujemo Keplerjevo okno. Položaje vseh znanih eksoplanetov do 10. marca 2026 prikazuje slika 1. 25. decembra 2021 je bil v vesolje izstreljen najbolj zmogljiv teleskop vseh časov – vesoljski teleskop James Webb. Njegovi izredno občutljivi spektrometri omogočajo, da lahko prvič v zgodovini določamo sestavo atmosfer eksoplanetov.

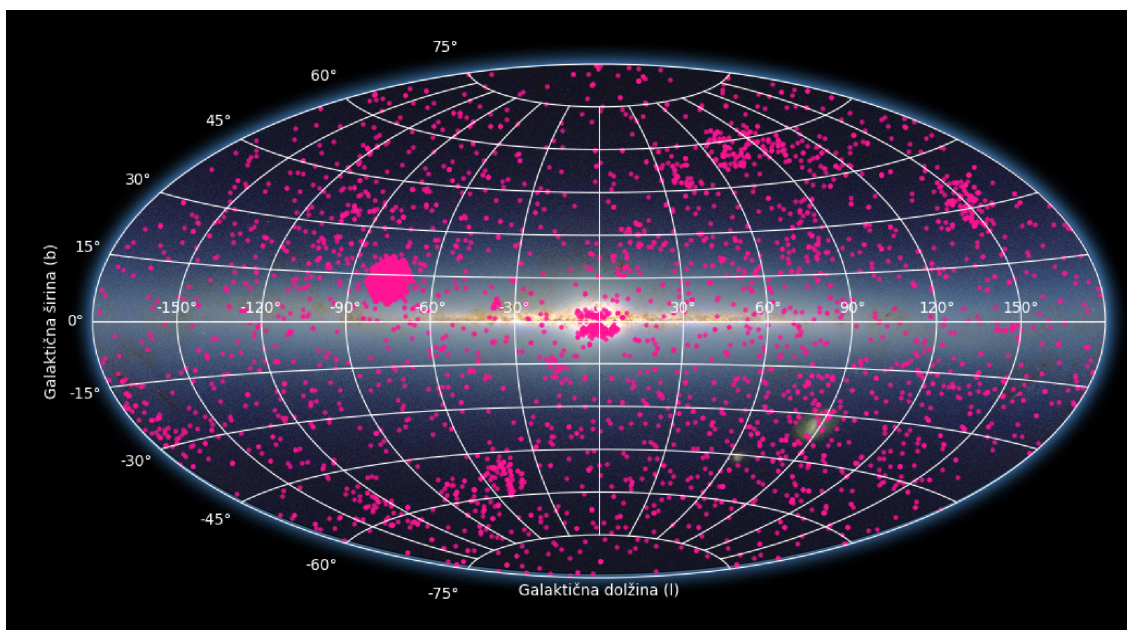
V nadaljevanju si bomo pogledali, kaj sploh je atmosfera in kako nastane. Kateri pogoji morajo biti izpolnjeni, da se atmosfera eksoplaneta ohrani? Kako lahko ocenimo temperaturne razmere na eksoplanetu? Kako na temperaturo vpliva atmosfera? Za konec si bomo pogledali tehnike, s katerimi vesoljski teleskop James Webb odkriva sestavo atmosfer eksoplanetov. Z dolgotrajnimi meritvami lahko namreč na eksoplanetu zaznamo celo oblačnost in vetrove.

2. Definicija in nastanek atmosfere

Atmosfera je plast (ali več plasti) plina, ki obdaja nebesno telo. Verjetno najprej pomislimo na atmosfero okoli kamnitega planeta, v resnici pa je atmosfera veliko širši pojem. Pri plinastih planetih atmosfero predstavljajo zunanje plasti plina. Atmosfere imajo tudi zvezde, in sicer so to površinske plasti plina, skozi katere sevanje zvezde potuje v vesolje. Začasne atmosfere razvijejo tudi kometi, ko se približajo svoji zvezdi. Takrat namreč led na njih sublimira in tvori plinasto ovojnico okoli jedra kometa [6].

Planeti lahko pridobijo atmosfero na tri načine:

1. Atmosfera nastane skupaj s planetom, ko se ta tvori iz začetnega diska plina in prahu okoli mlade zvezde. Takšnim atmosferam pravimo primarne in so značilne za plinaste planete. Sestavljene so večinoma iz vodika, helija itd., torej iz prvotnih sestavin diska plina in prahu.



Slika 1. Na sliki so označeni položaji na nebu vseh do 10. marca 2026 odkritih eksoplanetov. Sliko sem narisala s podatki iz [2]. Zgoščeno območje s središčem na 13° galaktične širine in 76° galaktične dolžine je Keplerjevo okno, ki je zaradi projekcije videti večje, kot je v resnici. Vir ozadja slike: [5].

2. Atmosfera nastane iz plina, ki se sprošča iz notranjosti planeta na tri načine. Prvi je vulkanizem. Ko magma pride iz notranjosti planeta na površje, kjer je tlak manjši, se iz nje izločijo ujeti plini. Tako je nastalo ozračje na Zemlji. Drugi način je izplinjevanje (ang. *outgassing*), kar pomeni, da se plini sproščajo iz razpok in poroznih kamnin na površju planeta. Tretji način so kemijske reakcije v skorji in plašču planeta, ki ustvarjajo nove pline, ki potem tvorijo atmosfero. Vsem tem atmosferam pravimo sekundarne in so značilne za kamnite planete. Sestavljene so večinoma iz ogljikovega dioksida, vodne pare itd.
3. Atmosfera nastane iz zunanjih virov. Planet lahko zajame delce zvezdnega vetra, ali pa pline na njegovo površje v zamrznjeni obliki prinesejo padci meteoritov [7].

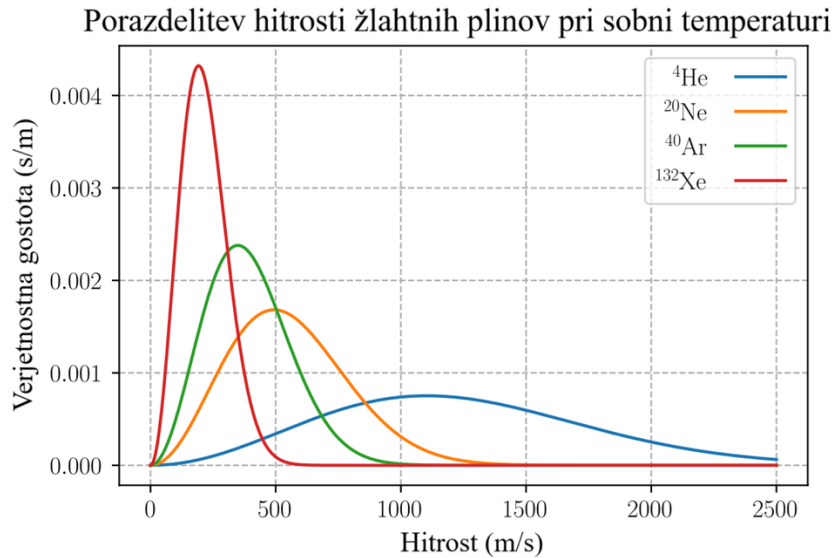
3. Obstojnost atmosfer eksoplanetov

Ko atmosfera eksoplaneta nastane, ni nujno, da je stabilna. Obstaja veliko različnih načinov uhanja atmosfer, ki jih razdelimo na termične in netermične.

3.1 Termični načini uhanja atmosfer eksoplanetov

Obstajata dva termična načina uhanja atmosfer: Jeansovo uhanje in hidrodinamski pobeg atmosfere. **Jeansovo uhanje** atmosfere je uhanje molekule za molekulo. Delec plina ima pri temperaturi T povprečno energijo $E = \frac{3}{2} k T$, kjer je k Boltzmannova konstanta. Pri višjih temperaturah bodo imeli torej delci večjo energijo in posledično višje hitrosti. Ubežna hitrost eksoplaneta je $v_{ub} = \sqrt{2GM/R}$, kjer je G gravitacijska konstanta, M masa eksoplaneta in R polmer eksoplaneta. Če hitrost delca preseže ubežno hitrost eksoplaneta, ta uide iz atmosfere, če se na svoji poti ne zaleti v drug delec, ki bi mu zmanjšal hitrost. Predpostavimo, da je atmosfera v termodinamičnem ravnovesju in so hitrosti delcev porazdeljene po Maxwellovi porazdelitvi. Različni delci imajo pri določeni temperaturi enako povprečno kinetično energijo, ker pa se razlikujejo po masi, so njihove povprečne hitrosti različne. Na sliki 2 vidimo, da imajo lažji delci v povprečju višje hitrosti, saj je njihova kinetična energija $E = \frac{1}{2} m v^2$. Zato je Jeansovo uhanje značilno predvsem za lažje delce

v zgornjih bolj vročih plasteh atmosfere. Zadostuje že, da imajo hitrosti, večje od ubežne, le delci povsem v repu Maxwellove porazdelitve. Sčasoma bo namreč ušel velik delež delcev. Z Jeansovim uhajanjem razložimo odsotnost vodika in helija v atmosferah Venere, Zemlje in Marsa.



Slika 2. Maxwellova porazdelitev hitrosti za različne pline pri sobni temperaturi. Na vodoravni osi je hitrost delcev, na navpični osi pa verjetnostna gostota. Vidimo, da imajo lažji atomi helija v povprečju višje hitrosti od atomov težjih elementov. Prirejeno po: [8].

Hidrodinamski pobeg atmosfere je prisoten pri eksoplanetih okoli mladih ali aktivnih zvezd. Te namreč planet bombardirajo z rentgenskim in visoko energijskim UV sevanjem (XUV sevanje). Plin se segreje, posledično se razširi in dviga. Zaradi manjšega tlaka in gostote glede na okolico se njegovo dvigovanje pospešuje, dokler ne preseže hitrosti pobega in uide v vesolje. Za razliko od Jeansovega uhajanja atmosfere, kjer uhajajo posamične molekule, se pri hidrodinamičnem uhajanju atmosfere pojavi plinski tok in atmosfera odteka kot celota [9].

3.2 Netermični načini uhajanja atmosfer eksoplanetov

Netermični načini izgube atmosfer niso povezani s temperaturo. Običajno so posledica električnih in magnetnih polj, zvezdnega vetra ali visokoenergijskega sevanja. Našteli bomo nekatere izmed njih:

1. Nevtralni atomi v zgornji atmosferi se lahko ionizirajo in magnetno polje zvezdnega vetra jih odnese stran od eksoplaneta.
2. Včasih pri združitvi iona in elektrona nastane nevtralni atom z dovolj veliko hitrostjo, da uide iz atmosfere.
3. Fotoni UV svetlobe lahko razbijejo molekule na manjše dele. Nastali hitri atomi dosežejo hitrost, večjo od ubežne, in uidejo v vesolje.
4. Fotoni UV svetlobe iz atomov v zgornji atmosferi izbijejo elektrone, ki jih imenujemo fotoelektroni. Nekateri lahki ioni, kot so H^+ , He^+ in O^+ , dosežejo hitrosti, večje od ubežnih, in uidejo v vesolje.
5. Delci zvezdnega vetra zadenejo delce v zgornjih plasteh atmosfere in jih izbijejo v vesolje. Pojav imenujemo škropljenje (ang. *sputtering*).

6. Izgubo dela atmosfere lahko povzroči tudi padec velikega meteorita. Pri trku se namreč sprosti veliko energije, ki del atmosfere segreje do te mere, da molekule presežejo ubežno hitrost, in uidejo v vesolje.
7. Ioni uhajajo preko magnetnih silnic na polih planeta, kar imenujemo polarni iztok [10].

3.3 Primer eksoplaneta z repom

Zanimiv primer eksoplaneta, ki izgublja atmosfero, je WASP-69 b, ki je od nas oddaljen 164 svetlobnih let. Nahaja se tako blizu svoje zvezde, da jo obkroži v zgolj 3,9 zemeljskih dneh [11]. Posledično se je atmosfera na njem tako zelo segrela, da so molekule presegle ubežno hitrost in uhajajo v vesolje v procesu hidrodinamskega pobega atmosfere. Zvezdni veter matične zvezde je poskrbel, da molekule v vesolje ne uhajajo enakomerno v vse smeri, pač pa se je za planetom oblikoval rep atmosfere, ki ga lahko primerjamo z repi, ki nastanejo za kometi v našem Osončju. Planetova atmosfera izgubi eno maso Zemlje na vsako milijardo let, kar je izredno malo v primerjavi s celotno maso planeta, ki je 90 mas Zemlje, tako da ni nevarnosti, da bi planet izgubil celotno atmosfero [12].

4. Ravnovesna temperatura eksoplaneta in vpliv atmosfere nanjo

Za eksoplanete lahko predpostavimo, da so v sevalnem ravnovesju. Toliko energije, kot prejmejo od matične zvezde, tudi oddajo v obliki sevanja. Predpostavimo, da planet nima drugih virov energije, kot so na primer radioaktivni razpadi, plimsko gretje itd., in da je temperatura po celotnem površju planeta enaka (planet se hitro vrti okoli svoje osi). To značilno temperaturo bomo imenovali ravnovesna temperatura. Predpostavimo, da planet seva kot črno telo. Prejeta moč znaša

$$P_{\text{prejeta}} = (1 - a) \frac{L}{4\pi d^2} \pi R_p^2, \quad (1)$$

kjer je L je izsev zvezde, d oddaljenost planeta od zvezde, a delež gostote svetlobnega toka, ki se odbije od površja planeta nazaj v vesolje (albedo planeta) in R_p polmer planeta. Planet moč prejema na okrogli ploskvici, ki je enaka preseku planeta. Oddana moč je enaka

$$P_{\text{oddana}} = \sigma T_p^4 4\pi R_p^2, \quad (2)$$

kjer je T_p ravnovesna temperatura planeta in σ Stefanova konstanta. Planet moč oddaja po celotni površini, ki je sferne oblike. Ko enačimo prejeta in oddana moč, dobimo izraz za ravnovesno temperaturo:

$$T_p = \left(\frac{(1 - a) L}{16\pi d^2 \sigma} \right)^{1/4}. \quad (3)$$

Zanimivo opažanje je, da v enačbi za ravnovesno temperaturo polmer planeta ne nastopa. Na neki razdalji od zvezde imata po naših predpostavkah tako delec prahu kot ogromen planet enako ravnovesno temperaturo. Če v enačbo (3) vstavimo podatke za Zemljo, dobimo $T_p = -18^\circ\text{C}$, za kar vemo, da ni realen rezultat. V obravnavi smo namreč pozabili na atmosfero, ki ima pri mnogih planetih velik vpliv na temperaturne razmere na planetu.

Obravnavajmo zdaj eksoplanet in atmosfero eksoplaneta kot dve ločeni telesi. Eksoplanet ima ravnovesno temperaturo T_p , atmosfera pa T_{atm} . Predpostavimo, da je atmosfera prozorna za sevanje z zvezde, torej moč prejema samo od eksoplaneta. Površina, na kateri prejema moč, je enaka površini planeta. Emisivnost atmosfere je ϵ_{atm} . Po Kirchhoffovem zakonu je emisivnost enaka absorptivnosti [13]. Predpostavimo, da je atmosfera tanka v primerjavi s polmerom planeta. Moč oddaja na svoji

zgornji in spodnji površini, zato je ta enaka dvakratniku površine planeta. Če izenačimo moč, ki jo atmosfera prejme in moč, ki jo atmosfera odda, dobimo

$$\epsilon_{atm}\sigma T_p^4 4\pi R_p^2 = 2\epsilon_{atm}\sigma T_{atm}^4 4\pi R_p^2. \quad (4)$$

Planet moč z zvezde prejema na okrogli ploskvi, ki je enaka preseku planeta. Moč od atmosfere pa prejema po svoji celotni površini. Če izenačimo moč, ki jo eksoplanet prejme in moč, ki jo eksoplanet odda, dobimo

$$(1 - a) \frac{L}{4\pi d^2} \pi R_p^2 + \epsilon_{atm}\sigma T_{atm}^4 4\pi R_p^2 = \sigma T_p^4 4\pi R_p^2. \quad (5)$$

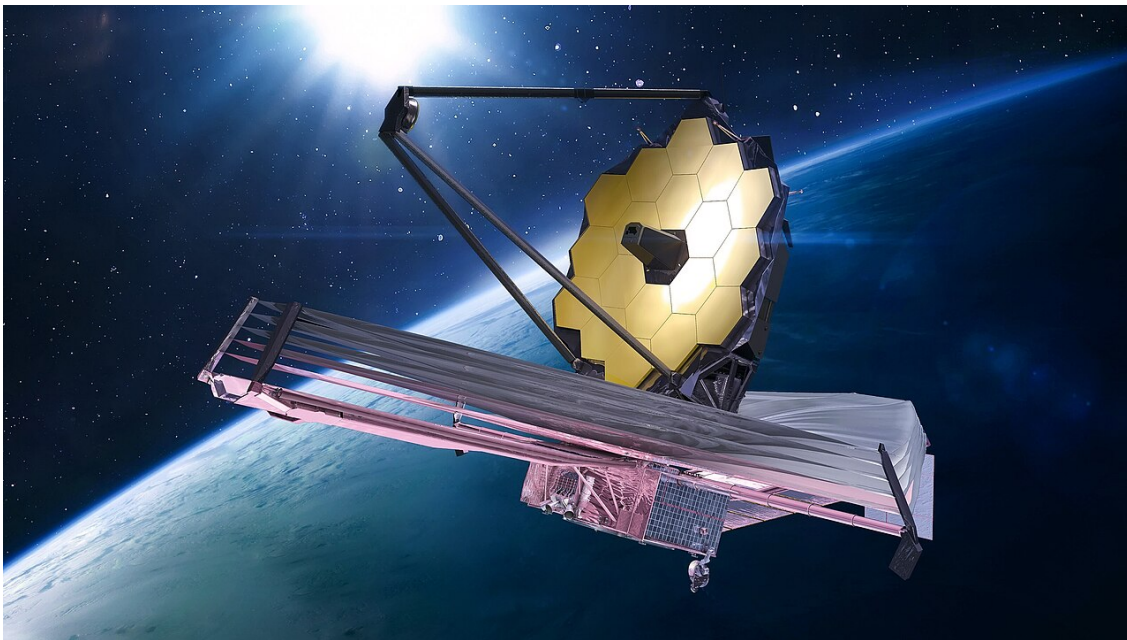
Ko rešimo sistem enačb (4) in (5), sledi

$$T_p = \left(\frac{(1 - a) L}{16\pi d^2 \sigma} \right)^{1/4} \left(\frac{1}{1 - \frac{\epsilon_{atm}}{2}} \right)^{1/4}. \quad (6)$$

Če v enačbo (6) vstavimo podatke za Zemljo ($\epsilon_{atm} = 0,7$), dobimo $T_p = 11^\circ\text{C}$, kar je veliko bližje realni vrednosti za povprečno temperaturo na Zemlji, ki znaša 15°C [14]. Tako vidimo, da je pri modeliranju temperatur na eksoplanetih natančno upoštevanje atmosfere ključnega pomena. Računali smo z zelo preprostim modelom atmosfere. Z izpopolnjenimi modeli lahko temperaturne razmere na eksoplanetu natančneje določimo. Pogosto astronomi poskušamo identificirati planete, primerne za življenje, in pri tem so podatki o atmosferi izjemno pomembni [15].

5. Ugotavljanje sestave atmosfer eksoplanetov s pomočjo vesoljskega teleskopa James Webb

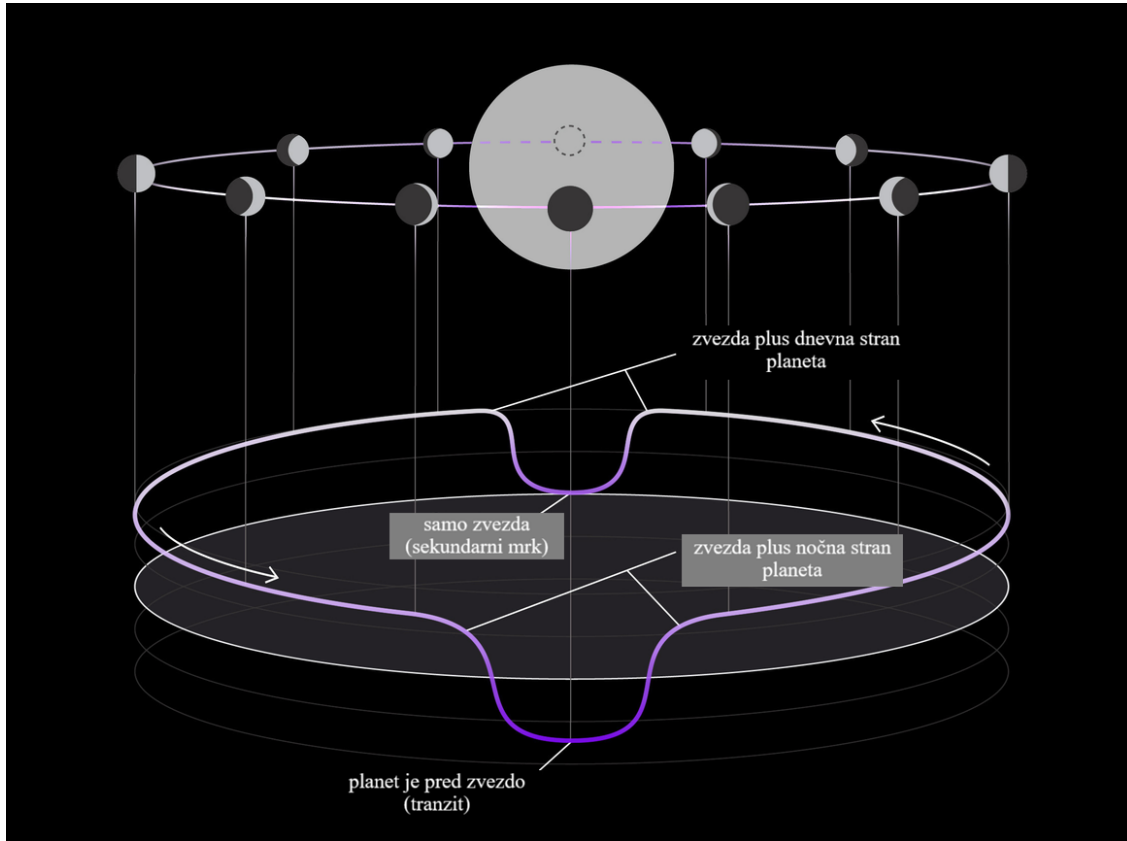
Vesoljski teleskop James Webb, ki ga vidimo na sliki 3, je najzmogljivejši teleskop za raziskovanje najbolj oddaljenih območij vesolja ter predstavlja naslednika Hubblovega teleskopa. Izstreljen je bil 25. decembra 2021 in se danes nahaja v točki približno 1,5 milijona kilometrov od Zemlje. Deluje v infrardečem delu spektra, njegovo glavno zrcalo pa ima premer 6,5 metra [16]. Webb je dosedaj opazoval že več kot 100 atmosfer eksoplanetov, pri tem pa uporabil metodi tranzitne spektroskopije in termične emisije, ki ju bomo podrobneje opisali [17].



Slika 3. Ilustracija teleskopa James Webb v vesolju. Vir: [18].

5.1 Tranzitna spektroskopija

Prehod, ki ga s tujko imenujemo tranzit, je pojav, ko eksoplanet gledano z Zemlje preide preko ploskvice svoje zvezde (glej sliko 4). To zaznamo kot upad gostote svetlobnega toka z zvezde. Če narišemo gostoto svetlobnega toka v odvisnosti od časa, dobimo krivuljo prehoda, katere primer je na sliki 5.

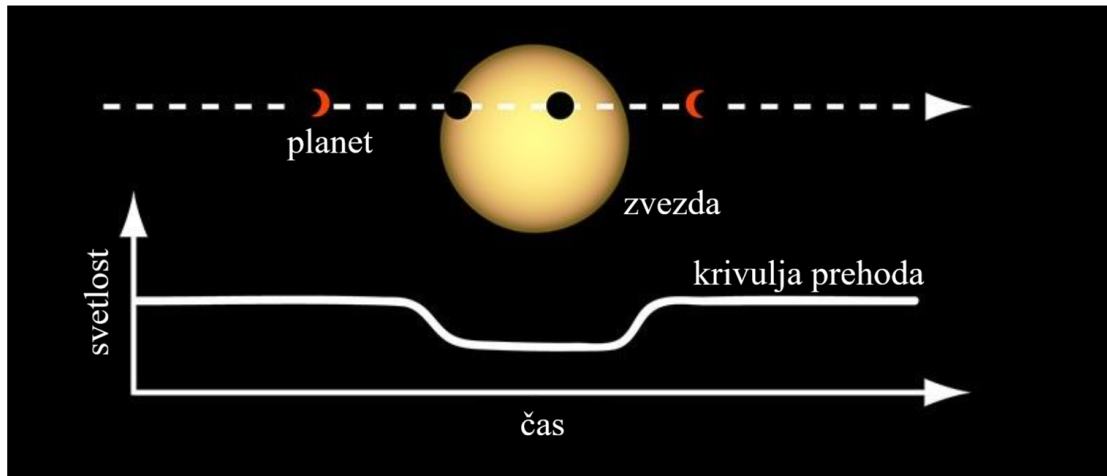


Slika 4. Skica kroženja eksoplaneta okoli zvezde (zgoraj) in svetlobne krivulje (spodaj). S popolnoma črnim krogcem je označen položaj planeta, ko je ta v prehodu in lahko izvajamo tranzitno spektroskopijo. Pojav, ko se planet gledano z Zemlje skriva za ploskvico svoje zvezde, imenujemo sekundarni mrk. Na sliki je sekundarni mrk prikazan s črtkano krožnico. Med prehodom in sekundarnim mrkom se spreminja delež osvetljenosti ploskvice planeta, kot ga vidimo z Zemlje. Prirejeno po: [19].

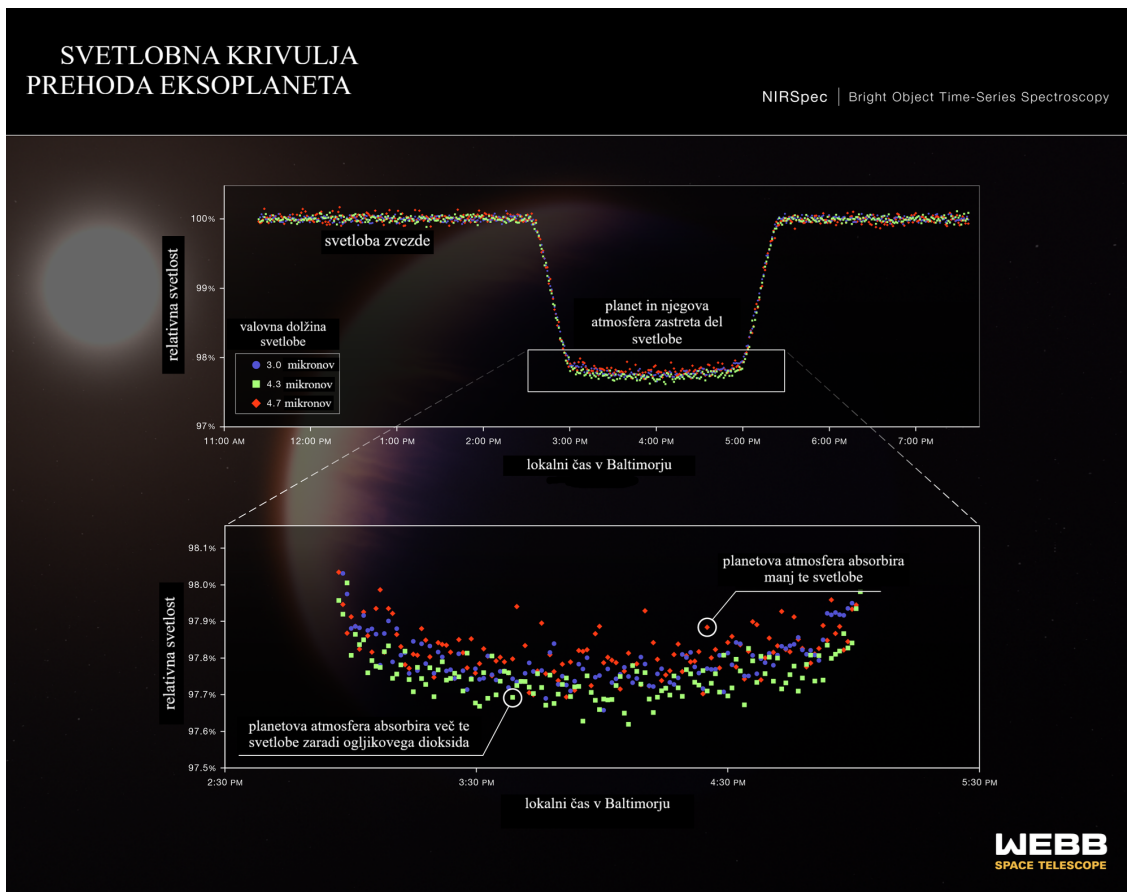
V primeru eksoplaneta z atmosfero bo med prehodom del svetlobe zvezde prešel skozi atmosfero eksoplaneta, kjer lahko pride do absorpcije svetlobe določenih valovnih dolžin. S primerjavo spektra med prehodom in spektra same zvezde lahko določimo, katere valovne dolžine so bile absorbirane ter jakost njihove absorpcije. Postopek imenujemo tranzitna spektroskopija. Vsak plin ima svoj značilen absorpcijski spekter, nekakšen prstni odtis. Iz podatkov lahko tako preko modeliranja določimo, kateri plini so prisotni v atmosferi eksoplaneta.

Kot primer si lahko ogledamo, kako so raziskovalci določili sestavo atmosfere eksoplaneta WASP-39 b. Ta ima namreč najbolj podrobno raziskano atmosfero od vseh eksoplanetov, ki jih poznamo. Gre za plinastega velikana z maso 0,28 mase Jupitra, ki je od nas oddaljen 700 svetlobnih let. Giblje se okoli Soncu podobne zvezde, njegova obhodna doba pa je samo štiri zemeljske dni [20]. Zaradi neposredne bližine zvezde je njegova atmosfera zelo razširjena, tako da njegov polmer z atmosfero znaša kar 1,27 polmera Jupitra, kar je idealno za tranzitno spektroskopijo. Instrument NIRSspec (Near-Infrared Spectrograph) teleskopa James Webb je izmeril svetlobno krivuljo tranzita tega eksoplaneta pri več valovnih dolžinah od 3 do 5,5 μm . Raziskovalci so opazili, da so bile nekatere valovne dolžine absorbirane bolj kot druge. Največjo absorpcijo so opazili pri 4,3 μm (glej

sliko 6) in je posledica prisotnosti ogljikovega dioksida v atmosferi eksoplaneta WASP-39 b [21]. Odkritje so objavili avgusta 2022.



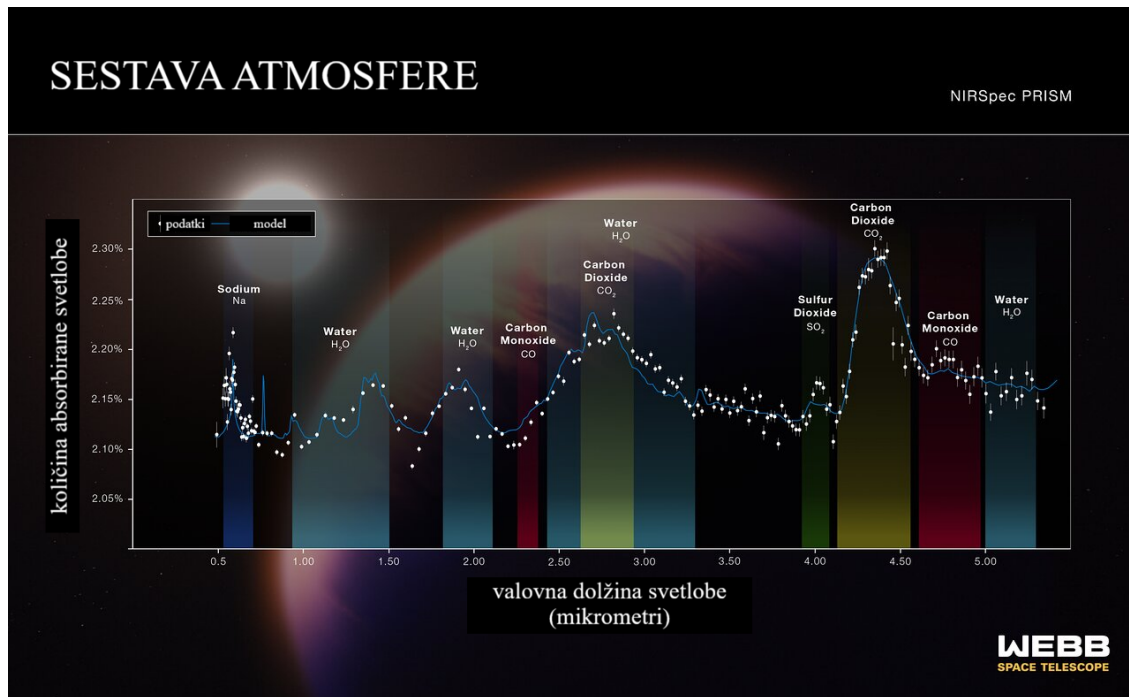
Slika 5. Primer svetlobne krivulje prehoda eksoplaneta. Ko eksoplanet preide preko ploskvice zvezde prestreže del njene svetlobe, kar na Zemlji zaznamo kot padec gostote svetlobnega toka zvezde. Prirejeno po: [22].



Slika 6. Svetlobno krivuljo prehoda eksoplaneta WASP-39 b so posneli pri več ločenih valovnih dolžinah. Na vodoravni osi je čas, na navpični osi pa navidezna svetlost. Podatki za $3\ \mu\text{m}$ so v modri, za $4,3\ \mu\text{m}$ v zeleni in za $4,7\ \mu\text{m}$ v rdeči barvi. Ko gre planet pred zvezdo, pri vseh opazimo manjšo navidezno svetlost. Povečani prikaz tega območja je v spodnjem delu slike, kjer vidimo, da se je različnim barvam navidezna svetlost različno zmanjšala. Najbolj se je zmanjšala valovni dolžini $4,3\ \mu\text{m}$, saj jo je absorbiral ogljikov dioksid v planetovi atmosferi. Prirejeno po: [21].

Nekaj mesecev kasneje, novembra 2022, so raziskovalci objavili rezultate za širše spektralno

območje, $0,6 \mu\text{m}$ (rdeča) do $5,3 \mu\text{m}$ (bližnja infrardeča), ki jih vidimo na sliki 7. Spekter je bil posnet z instrumenti NIRSpec (Near-Infrared Spectrograph), NIRISS (Near-Infrared Imager and Slitless Spectrograph) in NIRCam (Near-Infrared Camera). Poleg ogljikovega dioksida so potrdili še obstoj vode, natrija, ogljikovega monoksida in žveplovega dioksida [23]. Odkritje žveplovega dioksida je bilo še posebej prelomno, saj njegov kemični nastanek sprožijo fotoni visokih energij (UV svetloba). To je bilo prvo dokazano odkritje fotokemije v atmosferi eksoplaneta [24].



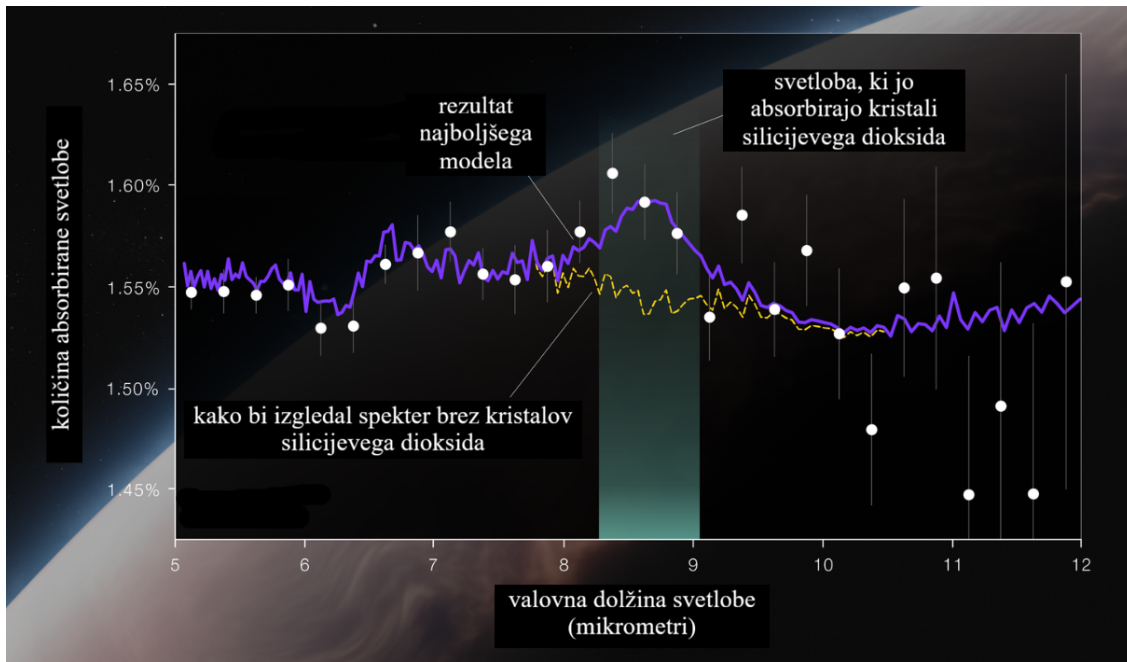
Slika 7. Celoten spekter atmosfere WASP-39 b. Na vodoravni osi je valovna dolžina svetlobe, na navpični osi pa intenziteta absorpcije. Bele pike so meritve. Z modro črto je označen model, ki se najbolj prilega podatkom. Barvni pasovi označujejo značilna območja absorpcij za posamezne molekule. Vidimo, da ima rumeni pas ogljikovega dioksida pri $4,3 \mu\text{m}$ res najbolj močno absorpcijo izmed vseh prisotnih plinov. Prirejeno po: [23].

Poudariti je potrebno, da za določanje plinov v atmosferi eksoplanetov potrebujemo zelo natančne spektrometrске meritve, ki jih pred teleskopom James Webb ni bilo mogoče pridobiti. WASP-39 b pri svojem prehodu pred ploskvico zvezde prestreže le malo več kot 2 % svetlobe zvezde, razlike v absorpciji med posameznimi valovnimi dolžinami pa so še mnogo manjše (reda 0,1 %).

Eden najbolj znanih primerov, kjer so s tranzitno spektroskopijo odkrili oblake in njihovo sestavo, je eksoplanet WASP-17 b. Je plinasti planet, ki ima obhodno dobo okoli svoje zvezde 3,7 zemeljskih dni [25]. Absorpcijski spekter v območju valovnih dolžin od 5 do $12 \mu\text{m}$, ki ga vidimo na sliki 8, je pokazal, da atmosfera vsebuje oblake z 10 nm velikimi delci trdnega silicijevega dioksida, na kar nakazuje povečana absorpcija pri $8,6 \mu\text{m}$. Da so to oblaki iz trdnih delcev in ne iz plina, vemo, ker so za plin značilne ostre, ozke absorpcijske črte, medtem ko imajo trdi delci široke, gladke absorpcijske odtise v spektru [26].

5.2 Termična emisija in fazna krivulja

Pri tranzitni spektroskopiji opazujemo, kako se svetloba zvezde absorbira v atmosferi eksoplaneta (absorpcijski spekter). Pri termični emisiji pa opazujemo od eksoplaneta odbito svetlobo (emisijski spekter). Za to metodo je pomemben sekundarni mrk. To je trenutek, ko se eksoplanet v celoti skrije za ploskvico zvezde in izmerimo svetlobo zvezde brez prispevka eksoplaneta (glej sliko 4). To primerjamo s svetlobo zvezde in planeta v času, ko ni sekundarnega mrka, torej ko vidimo tudi od eksoplaneta odbito svetlobo. Razlika obeh predstavlja termično emisijo eksoplaneta.



Slika 8. Absorpcija spektra atmosfere eksoplaneta WASP-17 b. Na vodoravni osi je valovna dolžina svetlobe, na navpični osi pa intenziteta absorpcije. Bele točke so izmerjeni podatki. Vijolična krivulja je rezultat modela, ki se najbolj prilega meritvam. Zelen barvni pas prikazuje območje absorpcije za kristale iz silicijevega dioksida. Vidno povečana absorpcija v tem pasu potrjuje obstoj oblakov iz silicijevega dioksida. Prirejeno po: [24].

Planete poenostavljeno obravnavamo kot črna telesa, za katera velja Wienov zakon $\lambda_{\max} T = b$, kjer je λ_{\max} valovna dolžina, pri kateri ima odvod gostote svetlobnega toka po valovni dolžini maksimum, T temperatura planeta in b Wienova konstanta. Vidimo, da eksoplaneti niso dovolj vroči, da bi sevali v vidni svetlobi, zato sevajo v infrardeči. S prilagajanjem funkcije, ki predstavlja Planckov zakon, na spekter termične emisije eksoplaneta, izračunamo temperaturo eksoplaneta [13]. Iz spektralnih črt v infrardeči svetlobi (tako absorpcijskih kot emisijskih) sklepamo o plinih prisotnih v atmosferi.

Ko se planet giblje okoli zvezde, se spreminja z Zemlje viden delež osvetljenosti planeta. Pravimo, da se planetu spreminja orbitalna faza. Planet ima namreč vedno osvetljeno tisto stran, ki gleda proti zvezdi, oddaljeni opazovalec pa zazna delno osvetljeno planetovo ploskvico (glej sliko 4). Če zberemo podatke o termični emisiji eksoplaneta po večjem delu njegove orbite (pravimo, da merimo fazno krivuljo), lahko opazujemo, ali se različnim delom eksoplaneta temperatura spreminja. Tako lahko ugotovimo, ali je eksoplanet plimsko zaklenjen, kar pomeni, da ima eno stran ves čas obrnjeno proti zvezdi, drugo pa stran od nje. Če je razlika temperatur med dnevno in nočno stranjo velika, lahko sklepamo, da eksoplanet nima atmosfere. Prisotnost atmosfere namreč zmanjša temperaturno razliko med dnevno in nočno stranjo. Z daljšimi opazovanji sklepamo tudi o vetrovih v atmosferah eksoplanetov in ustvarimo celoten tridimenzionalen model atmosfere [27].

Eden najbolj znanih eksoplanetov, kjer so s pomočjo termične emisije odkrili sestavo atmosfere eksoplaneta, je 55 Cancri e. To je kamnit eksoplanet, ki je od nas oddaljen 41 svetlobnih let. Nahaja se tako blizu svoji Soncu podobni zvezdi, da znaša njegova obhodna doba le 0,74 zemeljskih dni. Njegovo kamnito površje je staljeno, najverjetneje je ocean magme, znanstveniki pa sklepajo, da je eksoplanet plimsko zaklenjen. Njegov emisijski spekter je prikazan na sliki 9. Izmerjena absorpcija med 4 in 5 μm je pokazatelj, da atmosfera vsebuje veliko ogljikovega dioksida oziroma ogljikovega monoksida. Dodaten dokaz za obstoj atmosfere je izmerjena temperatura na dnevni/vroči strani eksoplaneta, ki je veliko nižja od pričakovane. Če eksoplanet ne bi imel atmosfere, bi ta morala znašati okrog 2200 °C, izmerjena pa je 1540 °C. Tokovi magme sicer lahko prenašajo del toplote iz

- [8] *Maxwell–Boltzmann distribution*, https://en.wikipedia.org/wiki/Maxwell%E2%80%93Boltzmann_distribution#/media/File:MaxwellBoltzmann-en.svg, dostopano: 18.1.2026.
- [9] G. Hazra, *Atmospheric escape from exoplanets: recent observations and theoretical models*, *Reviews of Modern Plasma Physics* **9** (2025), no. 1, 18.
- [10] A.J.Coates, *Atmospheric escape*, <https://sci.esa.int/documents/33745/35957/1567258799920-Weihai-093-Coates-escape.pdf?utm>, dostopano: 18.1.2026.
- [11] *The extrasolar planets encyclopaedia: Planet wasp-69 b*, https://exoplanet.eu/catalog/wasp_69_b--935/, dostopano: 18.1.2026.
- [12] *Wasp-69b: New images reveal exoplanet's comet-like tail is surprisingly longer than previously observed*, <https://keckobservatory.org/wasp-69b/?utm>, dostopano: 18.1.2026.
- [13] J. Strnad, *Fizika, 1. del*, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za matematiko in fiziko, 2024.
- [14] *World meteorological organization: Wmo confirms 2025 was one of warmest years on record*, <https://wmo.int/news/media-centre/wmo-confirms-2025-was-one-of-warmest-years-record>, dostopano: 26.3.2026.
- [15] G. Skok, *Uvod v meteorologijo*, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za matematiko in fiziko, 2020.
- [16] ESA, *Webb*, https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Webb, dostopano: 18.1.2026.
- [17] NASA, *Nasa's tally of planets outside our solar system reaches 6,000*, https://www.nasa.gov/universe/exoplanets/nasas-tally-of-planets-outside-our-solar-system-reaches-6000/?utm_, dostopano: 27.3.2026.
- [18] *James Webb space telescope*, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:James_Webb_Space_Telescope_%28webb_telescope-orig%29.jpg, dostopano: 18.1.2026.
- [19] NASA, *Exoplanet phase curve (diagram)*, <https://science.nasa.gov/asset/webb/exoplanet-phase-curve-diagram/>, dostopano: 12.2.2026.
- [20] *The extrasolar planets encyclopaedia: Planet wasp-39 b*, https://exoplanet.eu/catalog/wasp_39_b--818/, dostopano: 18.1.2026.
- [21] NASA, *Exoplanet wasp-39 b (nirspec transit light curves)*, <https://science.nasa.gov/asset/webb/exoplanet-wasp-39-b-nirspec-transit-light-curves/>, dostopano: 18.1.2026.
- [22] NASA, *Light curve of a planet transiting its star*, <https://science.nasa.gov/resource/light-curve-of-a-planet-transiting-its-star/>, dostopano: 18.1.2026.
- [23] ESA, *Wasp-39 b atmospheric composition (nirspec prism)*, <https://esaweb.org/images/weic2221f/>, dostopano: 18.1.2026.
- [24] NASA, *Webb's impact on exoplanet research*, <https://science.nasa.gov/mission/webb/science-overview/science-explainers/webbs-impact-on-exoplanet-research/>, dostopano: 18.1.2026.
- [25] *The extrasolar planets encyclopaedia: Planet wasp-17 b*, https://exoplanet.eu/catalog/wasp_17_b--566/, dostopano: 18.1.2026.
- [26] D. Grant, N. K. Lewis, *JWST-TST DREAMS: Quartz Clouds in the Atmosphere of WASP-17b*, *Astrophysical Journal Letters* **956** (2023), no. 2, L32.
- [27] L. Kreidberg in K. B. Stevenson, *A first look at rocky exoplanets with JWST*, *Proceedings of the National Academy of Science* **122** (2025), no. 39, e2416190122.
- [28] NASA, *Nasa's webb hints at possible atmosphere surrounding rocky exoplanet*, <https://www.jpl.nasa.gov/news/nasas-webb-hints-at-possible-atmosphere-surrounding-rocky-exoplanet/?utm>, dostopano: 18.1.2026.