



Universiteit  
Leiden  
The Netherlands

## Lava worlds: characterising atmospheres of impossible nature

Zilinskas, M.

### Citation

Zilinskas, M. (2023, May 24). *Lava worlds: characterising atmospheres of impossible nature*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/3618852>

Version: Publisher's Version

License: [Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/3618852>

**Note:** To cite this publication please use the final published version (if applicable).

# LIETUVIŠKA SANTRAUKA

Vos prieš 30 metų mūsų supratimas apie kitus pasaulius nei Žemę buvo susietas tik su Saulės sistema. Devintajame dešimtmetyje, astronomams pradėjus ieškoti egzoplanetų, buvo daug skepticizmo, jog jos išvis egzistuoja. Požiūris dramatiškai pasikeitė 1992 m., aptikus pirmąsias dvi Žemės dydžio planetas aplink mirusią žvaigždę - jei mirusios žvaigždės gali turėti planetų, Paukščių Takas turėtų būti jomis užpildytas. Tolimų pasaulių paieška tęsėsi, ir tik po trejų metų buvo rasta pirmoji planeta, besisukanti aplink žvaigždę, panašią į Saulę. Ši planeta buvo dujinis milžinas, kurio orbitos periodas buvo 4,2 dienos - tai daugiau nei 7 kartus arčiau jo žvaigždės, nei Merkurijus arčiau Saulės. Astronomai atrado visiškai naują pasaulių rūšį, kurios Saulės sistemoje nėra - karštuosius Jupiterius. Kad ir kaip mažai tai buvo paremta tuometine teorija, buvo aišku, kad mums trūksta žinių apie planetų sistemas, kas paskatino žaibo greičiu išplitusį susidomėjimą egzoplanetų mokslo šaka.

Netrukus buvo sukurti nauji instrumentai ir metodai, kurių rezultatas - daugiau nei 5000 patvirtintų egzoplanetų. Nauji skaičiavimai rodo, kad Paukščių Tako galaktikoje planetų yra bent tiek pat, kiek žvaigždžių - šimtai milijardų, jei ne trilijonai. Karštojo Jupiterio atradimas buvo tik įvairovės, su kuria susidursime, pradžia. Netrukus bus atrastos superžemės, lavos pasauliai, šiltieji Neptūnai, sub-Neptūnai ir planetos, kurios yra tokios karštos, kad pamažu suyra į dulkes. Dauguma atrastų planetų sistemų visai nepanašios į Saulės sistemą. Daugumoje jų yra mažos orbitos planetų, kurios yra didesnės už Žemę ir arčiau Neptūno; kai kurios, pavyzdžiui, TRAPPIST-1, turi septynis Žemės dydžio pasaulius, išsidėsčiusius mažiau nei 19-os dienų orbitose; o kai kurių orbitos supa net kelias žvaigždes. Per 30 metų, žinomų planetų skaičiui išaugus nuo 8 iki daugiau nei 5000, mūsų suvokimas išsiplėtė iki beribės pasaulių įvairovės. Dabar akivaizdu, kad Saulės sistema yra tik vienas iš žvaigždžių susidarymo rezultatų, ir kad kosmosas yra pilnas pasaulių, kurie yra keistesni, nei mes galėtume įsivaizduoti.

Siekdami rasti planetas, astronomai sukūrė keletą efektyvių metodų. Vienas iš pirmųjų ir sėkmingiausių metodų buvo radialinio greičio poslinkių naudojimas. Planetos buvimas aplink žvaigždę priverčia abu objektus skrieti aplink bendrą masės centrą. Dėl sukkelto periodinio žvaigždės judėjimo stebimos spektro linijos pasislenka į skirtingus bangos ilgius. Didesnės masės planetos sukelia didesnius poslinkius, todėl naudojant radialinį greitį galima nustatyti ne tik planetos buvimą, bet ir jos masę. Naudodami šią techniką astronomai aptiko beveik tūkstantį planetų, tačiau ją greitai nustelbė fotometrinių tranzito metodas. Tranzitinė fotometrija remiasi orbitoje skriejančia planeta, kuri gali užstoti nedidelę dalį stebimos

žvaigždės šviesos. Šis pritemdymas matomas net naudojant „kiemo“ teleskopus. Pasitvirtinus šiam metodui, buvo paleisti keli kosminiai teleskopai dangui nuskečiuoti. Vos per dvejus stebėjimo metus NASA Keplerio teleskopas aptiko daugiau nei du tūkstančius planetų kandidatų, tarp jų ir pirmąsias į Žemę panašias planetas, skriejančias aplink į Saulę panašią žvaigždę. Naudojantis tranzito technika, iki šiol patvirtinta daugiau nei 2600 planetų. Pastaraisiais metais taip pat tapo įmanoma erdviškai atskirti planetas nuo jų žvaigždžių. Šis stulbinantis metodas yra žinomas kaip tiesioginis vaizdavimas, ir, būnant tik pradiniam etape, jau buvo sėkmingai panaudotas nufotografuoti kelias dešimtis jaunų sistemų. Jupiterio dydžio planetas galima tiesiogiai pamatyti skriejančias aplink tolimas žvaigždes. Naudojant naujos kartos teleskopus, tokius kaip ELT, tiesioginio vaizdo metodas gali pateikti pirmąsias į Žemę panašių pasaulių nuotraukas.

Nustačius planetos masę ir dydį, galime įvertinti jos tūrinės savybes, tačiau galime ją apibūdinti išsamiau, sužinoti atmosferos, paviršiaus, vidaus sudėtį ir net aplinkybes, kuriomis ši planeta susiformavo. Šiuo metu vienas iš perspektyviausių būdų tai padaryti yra planetos atmosferos ištyrimas naudojant spektroskopiją. Tranzito spektroskopija ilgą laiką buvo naudojama tiriant Saulės sistemą ir buvo greitai pritaikyta matuoti egzoplanetų atmosferas. Skirtingai nuo fotometrijos, spektroskopija remiasi planetos stebėjimu įvairiais bangos ilgiais. Kai planeta užstoja žvaigždę, jos atmosfera veikia kaip filtras, priklausantis nuo aukščio ir bangos ilgio. Tam tikrus bangos ilgius sugeria atmosferos cheminės medžiagos. Kiekvienas unikalus atomas ir molekulė turi savo spektroskopinį neskaidrumą, kuris leido astronomams išskirti daugybę cheminių rūšių egzoplanetose; iki šiol, jau daugiau nei 20 periodinės lentelės elementų, įskaitant  $H_2O$ ,  $CO$ ,  $NH_3$ ,  $CH_4$ ,  $HCN$ ,  $TiO$  ir keletą kitų molekulių. Nors dauguma jų buvo rasta ant dujų milžinų, antžeminiams pasauliams apibūdinti reikalingas jautrumas ir spektrinė aprėptis ką tik buvo pasiekti James Webb kosminiu teleskopu (JWST).

Tranzito metodas turi ir trūkumų, didžiausias jų - nesugebėjimas ištirti kompaktiškos atmosferos. Kadangi nemaža dalis atrastų egzoplanetų yra pakankamai įkaitusios, jog skleistų aptinkamą šviesą (arba ją atspindėtų), buvo sukurtas papildomas jų atmosferos ištyrimo metodas – emisijos spektroskopija. Planeta yra stebima prieš pat užtemimą ir jo metu. Paėmus skirtumą tarp spektrų, gauname tik planetos emisiją. Kadangi signalas gaunamas iš skirtingas temperatūras turinčių cheminių medžiagų, tai leidžia mums ištirti ne tik vertikalią atmosferos šiluminę struktūrą, bet netgi sukurti išilginius žemėlapius, vadinamus fazių kreivėmis. Pati pirmoji antžeminio pasaulio, esančio už Saulės sistemos ribų, fazės kreivė buvo gauta 2016 m., superžemės, pavadintos 55 Cancri e. Stebėjimai atskleidė paslinkusį karštą tašką, kuris labiausiai paaiškinamas tik pernešant šilumą atmosferoje. 55 Cancri e temperatūra dieną viršija 2700 K, todėl tai laikoma lavos pasauliu, galbūt padengtu išsilydžiusių silikatų vandenynais. Dabartinė teorija numato, kad lavos pasauliai turi silpną silikatų atmosferą, kurią palaiko paviršinis magmos garavimas. Nors atmosfera lavos pasauliuose dar nebuvo aptikta, JWST netrukus gali patvirtinti arba paneigti jų buvimą.

Mes nuodugniai suprantame planetos atmosferą tik tada, jei galime atkurti stebėjimų rezultatus skaičiavimo modeliais. Gerėjant supratimui apie fizinius procesus, įgyjame žinių, reikalingų sukurti tikslius stebėjimus imituojančius modelius.

Šiomis dienomis netgi įmanoma imituoti pilną 3-D kai kurių planetų klimatą, tačiau skaičiavimo galia, reikalinga tokiems modeliams, yra brangi ir atima daug laiko. Kadangi mūsų bendras supratimas apie egzoplanetas vis dar yra pradiname etape, geresnis požiūris į problemą yra naudoti greitesnius ir lankstesnius vienmačius modelius. 1-D modeliai remiasi tuo, kad vidutines planetos savybes gerai atspindi tik vertikalus kitimas, ir iš tikrųjų pasirodė, kad jie yra neįkainojami numatant ir paaiškinant daugelį stebimų reiškinių. Pastaraisiais metais bendruomenė sutelkė dėmesį į statistinius metodus, remdamasi duomenimis pagrįstu modeliavimu. Nors tokie itin gerai paaiškina planetų savybes iš stebėjimų, jie vis tiek priklauso nuo pilnų modelių tikslumo.

Norint sukurti nuoseklų 1-D atmosferos modelį, reikia tik dviejų komponentų: spinduliuotės-perdavimo klimato modelio ir cheminio arba fotocheminio modelio. Pagrindinis klimato modelio principas – išspręsti atmosferoje sklindantį žvaigždžių srautą ir gauti temperatūros-slėgio profilį bei planetos spektrą. Naudojant įvairius aproksimacijas, konstrukcija gali būti sprendžiama lygiagrečioje plokštumoje, atsižvelgiant tik į vertikalią ašį. Srauto sklidimo atmosferoje visumą lemia jo cheminės rūšys, sugeriančios ir skleidžiančios tam tikrus šviesos dažnius. Tiksliam modeliui įtraukta net 50 ar daugiau rūšių, iš kurių daugelis turi milijardus unikalių spektro linijų. Nors įprastai tai būtų apskaičiavimo košmaras, buvo sukurti metodai, leidžiantys apytiksliai nustatyti spektrines linijas kompaktiškiau, neprarandant per didelio tikslumo – dėl to 1-D modeliai yra greiti ir veiksmingi.

Chemijos modeliai yra dviejų pagrindinių rūšių: termocheminė pusiausvyra ir fotocheminė kinetika. Pirmasis metodas yra gana paprastas – jis apėmia sistemos Gibso laisvosios energijos sumažinimą. Pusiausvyros chemija paprastai apima tūkstančius skirtingų molekulių, nes vienintelė reikalinga įvestis yra eksperimentiškai arba skaičiavimais nustatytos kiekvienos atskiros rūšies termodinaminės savybės. Kadangi pusiausvyros skaičiavimai yra greiti, metodas yra pritaikytas daugumai egzoplanetų stebėjimų. Tai ypač būdinga statistiniams modeliams, kuriems reikia apskaičiuoti milijonus atskirų atvejų. Tačiau norint atlikti išsamesnę analizę, būtinas fotocheminis metodas. Skirtingai nuo termocheminės pusiausvyros, kurioje daroma prielaida, kad cheminis laikas yra daug trumpesnis nei dinaminis, fotocheminiai kodai atsižvelgia į reakcijos greitį. Tiesą sakant, cheminės reakcijos vyksta labai skirtingais laikotarpiais, o ne spontaniškai, kaip teigia termochemija. Negana to, chemiją stipriai veikia atmosferos dinamika, taip pat žvaigždės spinduliuotė. Nors fotocheminiai modeliai yra daug tikslesni, jie turi didelių trūkumų – jie yra lėtesni ir reikalauja reakcijos greičio koeficientų, kurių ypač trūksta esant aukštai temperatūrai, ir kuriuos paprastai yra sunku nustatyti eksperimentiškai. Kadangi daugeliu atvejų susijusi chemija yra neįtikėtina sudėtinga, tai yra pagrindinis paklaidos šaltinis. Tai reiškia, kad tiek termocheminiai, tiek fotocheminiai modeliai yra neįkainojami egzoplanetų tyrimams. Net apytikslūs 1-D modeliai nuspėja ir paaiškina daugelį stebėjimų.

Šiame darbe didelis dėmesys skiriamas 1-D chemijos ir spinduliuotės perdavimo kodams, siekiant imituoti atmosferą, kuri gali supti stipriai apšvitintas superžemes. Pagrindinis tikslas yra nukreipti stebėtojus į galimai aptinkamas chemines rūšis, kurios padėtų mums suprasti daugelį pateiktų prielaidų ir sudaryti geresnius ir nuoseklesnius modelius. Dauguma pateiktų rezultatų pritaikomi mažos skiria-

mosios gebos infraraudonųjų spindulių spektroskopijai, kurie yra ypač tinkami stebėjimams naudojant JWST.

2-ame skyriuje imituojame volatilios atmosferos kompozicijas, supančias superžemę 55 Cancri e. Mes naudojame Titano atmosferą kaip atskaitos tašką ir cheminės kinetikos modelius su analitiniais temperatūros profiliais, kad apskaičiuotume daugybę galimų kompozicijų. Norėdami įvertinti stebimumą, papildomai generuojame emisijos ir tranzito spektrus, taikomus JWST bangų ilgiams. Rezultatai rodo, kad įmanoma atrasti tokias rūšis kaip HCN, CN arba CO, kurios greičiausiai reikėtų, jog atmosfera yra praturtinta anglimi.

3-iam skyriuje tęsiama volatilių atmosferų tema, bet papildomai yra pridėdami spinduliuotės perdavimo modeliai, apskaičiuojantys temperatūros struktūrą. Darbe daugiau dėmesio skiriama trumpųjų bangų sugerties gebėjimui, kurie gali sukelti temperatūros inversijas, kurios paveiktų stebimą spektrą. Iš tikrųjų mes nustatėme, kad CN buvimas gali sukelti galias inversijas atmosferose, kurių temperatūra  $> 2000$  K. Superžemių atmosfera, kurioje gausu anglies arba yra išsekęs vandenilis, yra ypač į tą linkusi.

4-ame skyriuje mes atsiribojame nuo volatilių kompozicijų ir tyrinėjame atmosferą, kurioje gausu silikatų, išsiskiriančių iš superžemėse esančių magmos vandenynų. Be spinduliavimo perdavimo ir atmosferos cheminių modelių, mes naudojame paviršiaus dujų išmetimo kodą, kuris nustato cheminių medžiagų biudžetą. Išsprendžiam šiluminę struktūrą, įskaitant paviršiaus temperatūrą kartu su chemija, visoms šiuo metu žinomoms lavos planetoms. Kaip ir ankstesniuose darbuose, mes papildomai imituojame emisijos spektrus. Rezultatai rodo, kad silikatinėse atmosferose greičiausiai lengviausia apibūdinti SiO ir SiO<sub>2</sub>. Siūlome, kad kai kuriems taikiniams juos būtų galima aptikti naudojant JWST MIRI instrumentą. Šiame tyrime taip pat randame papildomų rūšių, tokių kaip TiO, kurios gali būti labai susijusios su magmos sudėtimi ir paviršiaus vidine dinamika.

Galiausiai, 5-ame skyriuje apjungiamė visus ankstesnius tyrimus, kad modeliuotume volatilią atmosferą aplink superžemes ir sub-Neptūnus, kurios gali būti užterštos magmos dujų išsiskyrimo. Darbas yra pagrįstas prognozėmis, kad magmos vandenynai gali turėti didelius volatilių medžiagų rezervuarus, kurie apsaugo atmosferą nuo žvaigždžių erozijos. Modeliai orientuoti į H, C ir N atmosferas, praturtintas silikatais. Rezultatai rodo, kad silikato užterštumas gali būti aptiktas naudojant JWST dėl 5 ir 9  $\mu\text{m}$  SiO savybių, tačiau tikimasi, kad šios savybės sumažės dėl esančių volatilių medžiagų. Mes taip pat nustatėme, kad magmos paviršiaus dujų išmetimas gali sukelti galias šiluminės inversijas, net didelėse volatiliose atmosferose, o tai turi įtakos visiems stebėjimams. SiO aptikimas atmosferoje, kurioje gausu volatilių medžiagų, gali reikšti, kad planetoje yra paviršiaus magma, kuri efektyviai aprūpina atmosferą silikatais.

Taigi baigiame sakydami, kad nors tik per 30 metų egzoplanetų mokslo šaka atskleidė stulbinančią pasauliui įvairovę, tai iš tiesų yra tik pradžia. Spektroskopija yra galingas įrankis, leidęs astronomams pažvelgti į tolimų planetų atmosferas. Kol kas nėra vienareikšmių įrodymų, kad superžemės ar lavos pasauliai turi atmosferą. Tačiau JWST netrukus stebės keletą apšvitintų superžemių, tikėdamasis rasti cheminių savybių. Naujos kartos teleskopai ir skaičiavimo modeliai galimai leis mums įgyti nuodugnesnių žinių apie egzoplanetas, negu apie daugelį Saulės sis-

temos planetų. Neatmetama galimybė, kad netrukus mes sudarinėsime tolimųjų Žemių žemynų ir vandenynų žemėlapius, ir galbūt net atrasime biologinių procesų požymių. Tikimės, kad šioje tezėje atliktas darbas suteiks bent šiek tiek gairių ateities stebėjimams ir modeliavimo pastangoms.

