
POTRAGA ZA ŽIVOTOM U KOSMOSU

SEMINARSKI RAD IZ ASTROFIZIKE

TEODORA ŽIŽAK

1 Uvod

Slika 1: Zemlja snimljena sa Međunarodne svemirske stanice, [31]



Procenjuje se da na Zemlji živi oko 14 miliona različitih vrsta; od toga, oko 1.2 miliona je poznato, istraženo i dokumentovano. Smatra se da ukupan broj vrsta koje su ikada živele na Zemlji premašuje pet milijardi, od čega je 99% izumrlo (prema [10]). Pet milijardi različitih živih vrsta je nastalo, evoluiralo i nestalo na planeti Zemlji.

Kako to da još uvek nismo našli nijedan živi organizam nigde drugde?

Da li je život zaista tolika retkost u kosmosu? Koja je verovatnoća da smo jedini primerci živih bića u čitavom univerzumu?

S druge strane, koja je verovatnoća da ćemo u nepojmljivom prostanstvu kosmosa naići na makar jednu živu ćeliju — ili kolonije bakterija — ili čopore vukova — ili civilizacije?

Da bismo odgovorili na ova pitanja, potrebno je da proučimo život na Zemlji, a potom da podignemo pogled ka nebu i — tražimo.

2 Život kakav poznajemo

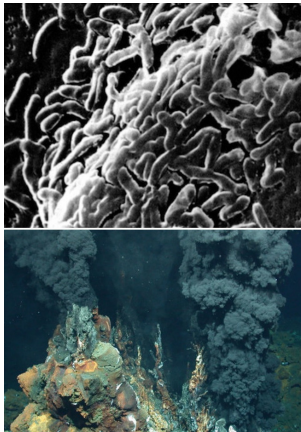
Proučavanje i upoređivanje milion i po živih vrsta tokom 300 godina dalo je zaključak da su sve one, ma koliko se međusobno razlikovale, sačinjene od 6 hemijskih elemenata: ugljenika (C), kiseonika (O), azota (N), vodonika (H), fosfora (P) i sumpora (S). Ugljenik se lako vezuje sa drugim elementima, kao i sa samim sobom, i može da gradi dugačke lance i složene, stabilne strukture. Kiseonik, azot i vodonik su sastavni delovi aminokiselina i masti (neophodnih za funkcionisanje živih organizama), kao i DNK-a i RNK-a — nosilaca genetskog materijala svakog živog bića, neophodnih za razmnožavanje i, samim tim, opstanak života. Fosfor je neophodan za građenje ADP-a i ATP-a, velikih molekula u kojima se skladišti energija, a sumporna jedinjenja su enzimi — katalizatori hemijskih reakcija u organizmu. Dakle, ovih **šest elemenata** su neophodni za nastanak i održavanje života.

Još jedna stvar koju znamo o živim bićima jeste da im je svima neophodna **tečna voda**. Pre svega, ona omogućava **protok materije** između ćelije i međućelijske sredine bez štetnih efekata za ćeliju ili materiju koja se transportuje. Ovaj protok je neophodan za gotovo sve ćelijske procese (zato voda mora da bude *tečna*). Dalje, voda je maltene univerzalan rastvarač. Sastoji se od jednog atoma kiseonika za koji su kovalentno (zajedničkim elektronskim parom) vezana dva atoma vodonika, pri čemu kiseonik ima veću elektronegativnost (težnju da privlači elektrone) nego vodonik, pa je molekul polaran — jedan deo mu je delimično pozitivan, a drugi delimično negativan; pozitivan deo molekula privlači negativne jone, a negativan deo molekula pozitivne, te je vodi veoma lako da rastvori razne supstance. Pošto je rastvaranje jedinjenja i supstanci jedan od osnovnih **izvora energije** u bilo kom organizmu, voda je najpogodnija (i izuzetno bitna) za život kakav poznajemo. Zemljina temperatura i atmosferski pritisak dozvoljavaju postojanje tečne vode na njenoj površini, što je takođe od izuzetnog značaja za život.

Treća stvar koju znamo o živim vrstama jeste da evoluiraju i da se prilagođavaju. S ciljem prilagođavanja uslovima sredine, razvijaju karakteristike koje im pomažu da prežive. Naravno, ovo se ne dešava preko noći — evoluciji je potrebno vreme i kontinualna izloženost sredini kojoj organizam treba da se prilagodi. Zbog toga se šansa za razvitak života povećava ukoliko nema naglih, ekstremnih promena spoljašnjih uslova — temperature, svetlosti, sastava atmosfere i slično.

Ono što obezbeđuje ove uslove za život na Zemlji jeste:

Slika 2: bakterije u okeanskim rovovima, [5]



1. oblak međuzvezdane materije iz koje je nastala
2. period neprestanih udara asteroida i kometa
3. Mesec
4. vrelo tečno metalno jezgro,

iz sledećih razloga.

1. Zemlja je nastala (kao i ostatak Sunčevog sistema) od oblaka međuzvezdane materije prethodno obogaćenog elementima neophodnim za život, koji su nastali u zvezdama prve generacije ili njihovim eksplozijama. Da je Zemlja bila planeta oko neke zvezde prve generacije, bila bi sastavljena od vodonika i helijuma, eventualno sa dodacima litijuma i berilijuma. To su jedini elementi koji su tada postojali.
2. Tokom i nakon nastanka Zemlje, udari asteroida i kometa su bili gotovo neprestani. Kako se većina asteroida sastoji uglavnom od ugljenika i silikata, sa tragovima raznih metala, a većina kometa u sebi ima dosta vodenog leda i raznih amonijakovih i ugljenikovih jedinjenja, sudari ovih malih tela sa Zemljom znatno su obogatili našu planetu materijom neophodnom za život.

3. Mesec je nastao kao rezultat sudara vrlo mlade Zemlje sa telom veličine današnjeg Marsa. Taj sudar je skinuo prilično mnogo materijala sa Zemlje, što je razlog zašto je Mesec toliko velik i masivan (drugi sateliti u Sunčevom sistemu su mnogo manji u odnosu na planete oko kojih orbitiraju). Ovo rezultuje relativno velikim gravitacionim uticajem Meseca na Zemlju, što se ispostavilo veoma značajno za nastanak i evoluciju života. Naime, Mesečev uticaj održava nagib Zemljine ose rotacije maltene konstantnim, što osigurava blage i postepene klimatske promene u okviru ustaljenih granica vezanih za određeno mesto na Zemlji. Oko ekvatora je uvek manje-više toplo, na polovima hladno, a temperaturne promene u međuzonama nisu ekstremne. Ovakva stabilnost daje živim organizmima priliku da evoluiraju — da se prilagode uslovima koji se postepeno menjaju (umesto da izumru usled ekstremne promene). Osim toga, Mesečev gravitacioni uticaj na plimu i oseku doveo je do stvaranja takozvanih plimskih basena — područja gde voda nadire i povlači se. U tim basenima se postepeno nagomilavala organska materija, što je znatno pospešilo razvoj života.

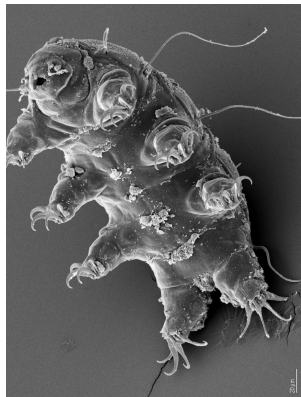
4. Zemljino jezgro sastoji se od gvožđa i nikla, koji su, kao najteži, pali u centar prilikom gravitacione akrecije i diferencijacije u nastanku planete. Unutrašnji sloj jezgra je čvrst, ali se njegov

spoljašnji sloj nalazi u tečnom stanju. Temperatura spoljašnjeg jezgra u slojevima najdaljim od centra — najbližim Zemljinoj površini — je oko 2700°C . Zahvaljujući tome postoje područja veoma tople vode u mračnim dubinama okeana — ta toplota je omogućila određenim organizmima da se razviju i žive upravo u tim područjima, uprkos nedostatku sunčeve svetlosti. Osim toga, sudaranje tektonskih ploča, koje plutaju na omotaču spoljašnjeg jezgra, dovodi do vulkanske aktivnosti na površini Zemlje — upravo su vulkanske erupcije, izbacujući velike količine ugljen-dioksida (koji je pomogao zagrevanje planete) i vodene pare (koja se kasnije kondenzovala i pala nazad na Zemljinu površinu u vidu kiše), formirale našu sadašnju atmosferu, koja štiti živa bića od štetnog zračenja, sprečava ekstremne temperaturne promene između dana i noći i postepeno zagreva planetu. Povrh svega ovoga, Zemljino metalno jezgro je provodna sredina, koja, usled Zemljine rotacije, generiše magnetno polje, štiteći atmosferu i sve unutar nje od naelektrisanih čestica sunčevog vetra.

Naposletku, četvrta stvar koju znamo o životu na Zemlji jeste da ga možemo naći i u veoma neprijateljskim sredinama — pustinjama, vrelim izvorima ili okeanskim dubinama. Organizmi koji žive u ovakvim ekstremnim uslovima, tzv. *ekstremofili*, nam pokazuju na kakve se sve nedostatke život može prilagoditi. Za sada znamo za

- termofile i hipertermofile — opstaju na temperaturama do 125°C (u gejzirima i vrelim izvorima)
- kriofile — opstaju na temperaturama ispod -15°C (u hladnom tlu, polarnom ledu, ispod alpskog snega)
- kserofile — opstaju u izuzetno suvim sredinama (u pustinjama)
- barofile — opstaju pod izuzetno visokim pritiskom (u okeanskim rovovima na dubinama preko 10km)
- acidofile — opstaju u izuzetno kiselim sredinama (pH vrednosti 3 ili manje)
- alkalifile — opstaju u izuzetno baznim sredinama (pH vrednosti 9 ili veće).

Slika 3: vodeni medved, [32]



Ovi organizmi su našli način da se hrane, razmnožavaju i dišu uprkos nedostacima sredina u kojima žive. Cijanobakterije (plavo-zelene alge) žive u stenama u pustinji Atakami — pošto stene imaju veću vlažnost od ostatka pustinje i propuštaju sunčevu svetlost, alge mogu da vrše fotosintezu i imaju izvor vode. U okeanskim rovovima postoje bakterije koje izvlače neophodan ugljenik iz vode (slika 2), a žive na bazi sumpor-vodonika (H_2S) — potpuno bez sunčeve svetlosti. U stenama na Antarktiku žive mikrobi koji vodu dobijaju otapanjem leda sa stene usled apsorpcije svetlosti. U jezeru Mono u Kaliforniji otkriveni su mikrobi koji su usled nedostatka fosfora isti zamenili (ne potpuno, doduše) arsenom — otrovnim za većinu živih vrsta. Na zapuštenim rudarskim lokacijama u Engleskoj, pronađeni su popularno nazvani “supercrvi”, koji se hrane olovom, cinkom, bakrom i arsenom. Naposletku, sve dosad pomenute organizme nadmašuje takozvani *vodeni medved* (slika 3) — organizam prosečne veličine jednog milimetra, koji živi u vodi i hrani se mahovinom. Vodeni medvedi mogu da prežive svemirski vakuum*, temperature od -272°C do 150°C , do šest puta veće pritiske od onih u okeanskim rovovima i hiljadu puta veće zračenje od smrtonosne doze; bez hrane i vode mogu izdržati više od mesec dana, pod uslovom da se nakon toga rehidriraju, posle čega su sposobni za reprodukciju.

Pošto su svi ovi ekstremofili sposobni za preživljavanje u inače smrtonosnim uslovima, sasvim je razumno razmatrati mogućnost postojanja života u otežanim uslovima na drugim planetama.

3 Sunčev sistem: traženje života u komšiluku

Kako ćemo prepoznati život ako ga nađemo? Svi oblici života za koje mi znamo su bazirani na šest hemijskih elemenata (ugljenik, kiseonik, vodonik, azot, sumpor i fosfor), ali ima i mnogo nežive materije koja takođe sadrži ove elemente. Ne možemo se osloniti na izgled, niti na ponašanje, jer to nije nešto što možemo da predvidimo. Dakle, ovo bi bio dobar trenutak zapitati se: kako definisati život?

Opšteprihvatarena definicija (prema [3]) je:

Živa bića su ona koja su sposobna za održavanje hemijskih reakcija (uz korišćenje energije), razmnožavanje i evoluciju.

*U okviru TARDIS-a — zajedničke misije Evropske svemirske agencije i ruskog FOTON-a — vodeni medvedi su poslani u svemir, na milost i nemilost vakuumu, zračenju i hladnoći. Nakon 12 dana, vratili su se na Zemlju živi i zdravi.

Iako nepotpuna (ne važi za mazge*, viruse†, jednoćelijske organizme koji nisu evoluirali...), ova definicija je i dalje najpreciznija koju imamo, i s njom u vidu, napuštamo Zemlju i pretražujemo Sunčev sistem, u potrazi za naznakom života na drugim planetama i njihovim satelitima.

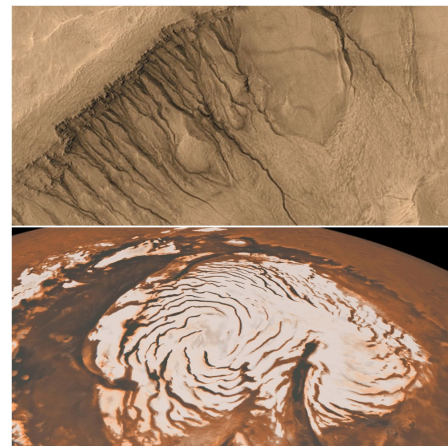
3.1 Mars

“Crvena planeta” uglavnom prva pada na pamet pri pomenu vanzemaljskog života i najčešće se sreće u naučnoj fantastici — kako u literaturi, tako i na filmu — upravo u ovom kontekstu; razlog tome su određene sličnosti između Marsa i Zemlje — skoro isto trajanje dana (dan na Marsu traje 24.6h), skoro isti nagib ose rotacije (25.2° , za oko dva stepena veći od Zemljinog), zaleđeni polovi, eolska erozija, kao i dokazi da je u prošlosti Mars takođe pretrpeo dosta udara i imao vulkansku aktivnost, tektonske ploče i tečnu vodu. Dakle, postoji mogućnost da je na Marsu u prošlosti bilo života.

Međutim, trenutni uslovi na Marsu su znatno drugačiji nego što se pretpostavlja da su bili pre tri i po milijarde godina. Pre svega, masa Marsa je svega oko 10% Zemljine mase, a njegov radijus upola manji od Zemljinog, što znači da je površinska gravitacija znatno manja nego na Zemlji — oko $0.38g$ (Zemljina je $1g$). Usled toga, atmosfera koja je počela da se formira izbacivanjem vulkanskih gasova je ubrzo oduvana sunčevim vetrom, pošto gravitacija nije bila dovoljno jaka da je zadrži (niti je Mars imao magnetno polje koje bi tu atmosferu zaštitilo od sunčevog vetra), što je dovelo do izuzetno razređene atmosfere koju Mars ima danas — atmosferski pritisak je svega 6mbar, što nije dovoljno za postojanje tečne vode na površini planete. Takođe, temperatura na Marsu je u proseku 210K (-63°C), što je daleko ispod tačke mržnjenja vode. Kad se sve uzme u obzir, dolazi se do zaključka da voda na površini Marsa mora biti zaleđena. 2004. godine, sonda *Mars Express* je otkrila vodeni led na južnom polu, a godinu dana kasnije i na severnom; 2008. *Phoenix* je uzeo uzorke vodenog leda sa Marsa (slika 3).

Postoje teorije, praćene argumentima i analizom marsovskog reljefa (slika 4), da tečna voda postoji ispod površine Marsa, u slojevima do 600m dubine. Za sada, tečna voda ispod površine najbolje objašnjava sedimentne stene nađene na površini i njihov mineralni sastav (sadrže jedinjenja koja se formiraju pomoću vode). Smatra se da se voda nagomilava ispod površine između dva sloja zemlje koja ne može da probije; nakon što se nagomila suviše vode, ona izbija na površinu i, u određeno doba godine, može kratko da se zadrži na površini u tečnom stanju. Kada se to desi, tekući po površini, voda pravi useke u reljefu u kojima se stvaraju hidrirane soli, koje ostaju tu i nakon što se voda povuče ili smrzne. Dakle, moguće je (i relativno verovatno) da tečna voda postoji ispod površine Marsa. Samim tim, ako *danas* ima života na Marsu, nećemo ga pronaći na površini. Prema teorijskim modelima, moguće je da neke vrste mikroba žive u tlu ili u stenama — ova živa bića dosad nisu pronađena, ali jesu pronađene male količine metana u gasovitom stanju, za koje znamo da su njihov “otpadni proizvod” (proizvod njihovog metabolizma). Međutim, isti taj metan se stvara i interakcijom UV zračenja sa ugljenikom, kog na Marsu ima prilično (u obliku ugljen-dioksida; marsovska atmosfera je 95% CO_2), tako da nismo sigurni šta stvara ovaj višak metana.

Slika 4: kanali i vodeni led na Marsu, [36] i [37]



3.2 Venera i Merkur

Što se tiče ostalih planeta Sunčevog sistema, ono što znamo nam govori da su šanse za postojanje života na njima vrlo slabe do nikakve. Venera, koja je po veličini i masi najslabija Zemlji i koja takođe ima vrelo jezgro, ima oko sto puta deblju atmosferu punu ugljen-dioksida i debelih oblaka sumporne kiseline; atmosferski pritisak od 100atm^\ddagger i površinska temperatura veća od 700K (427° — dovoljno da se otopi olovo) onemogućavaju postojanje tečne vode — pod tim uslovima, sva voda je para. Uzimajući u obzir, pored svega ostalog, burnu vulkansku aktivnost koja površinu planete održava nestabilnom, kao i vetrove koji, usled mnogo brže rotacije atmosfere u odnosu na samu planetu[§], dostižu brzinu od 350 km/h, dolazi se do zaključka da Venera nije prijateljski nastrojena prema životu. Merkur još manje: praktično bez atmosfere i dva i po do tri puta bliža Suncu nego Zemlja, ova planeta trpi ekstremne temperaturne promene (danju oko 700K, noću oko 100K), konstantno biva bombardovana UV zračenjem bez ikakve zaštite, a voda postoji samo u obliku leda na dnu udarnih kratera na polovima.

*Mazga nastaje parenjem kobile i magarca, koji imaju različit broj hromozoma: kobilica ih ima 64, a magarac 62, što ostavlja mazgu sa neparnim brojem hromozoma (63), usled čega mazge ne mogu da se razmnožavaju međusobno.

†Uprkos tome što imaju DNK i sposobni su za evoluciju, nemaju ćelijsku strukturu, što je osnovna gradivna jedinica svih živih organizama, tako da nije jasno na koji način su nastali niti kako evoluiraju, odnosno jesu li zaista živi.

‡Atmosfera (atm) je jedinica za pritisak; Zemljin atmosferski pritisak iznosi 1atm.

§Atmosfera završi jednu rotaciju za 4 dana, a planeta za 243 dana, što znači da atmosfera rotira oko 60 puta brže.

3.3 Nastanjiva zona

S druge strane, ako se okrenemo spoljašnjim planetama Sunčevog sistema, otkrićemo znatno drugačije sveteve sa svojim skupovima prepreka razvitku života. Za početak, za sve njih znamo da su van *nastanjive zone*.

Nastanjiva zona je interval rastojanja od matične zvezde unutar kog nebesko telo (koje se nalazi na datom rastojanju) može imati tečnu vodu na svojoj površini (uz dovoljan atmosferski pritisak). Dakle, svaka zvezda oko sebe ima različitu nastanjivu zonu, koja zavisi od njene luminoznosti. Pri računanju njenih granica, polazimo od činjenice da je voda tečna na temperaturama od 0°C do 100°C pod pritiskom od 1atm — dakle, svaka planeta čija je prosečna temperatura između 0°C i 100°C je unutar nastanjive zone oko svoje matične zvezde. Prosečna temperatura planete figuriše u Štefan-Bolcmanovom zakonu — planeta, kao i sva druga tela, izračuje energiju koju ima proporcionalno četvrtom stepenu temperature ($F = \sigma T^4$). S druge strane, planeta prima energiju od svoje matične zvezde i ta energija zavisi od luminoznosti zvezde i rastojanja do nje: $F = L/(4\pi r^2)$. Izjednačimo li ova dva fluksa, dobijamo

$$\sigma T^4 = \frac{L}{4\pi r^2},$$

odnosno

$$T^4 = \frac{L}{r^2} \frac{1}{4\pi\sigma} = \frac{L}{r^2} \times const.$$

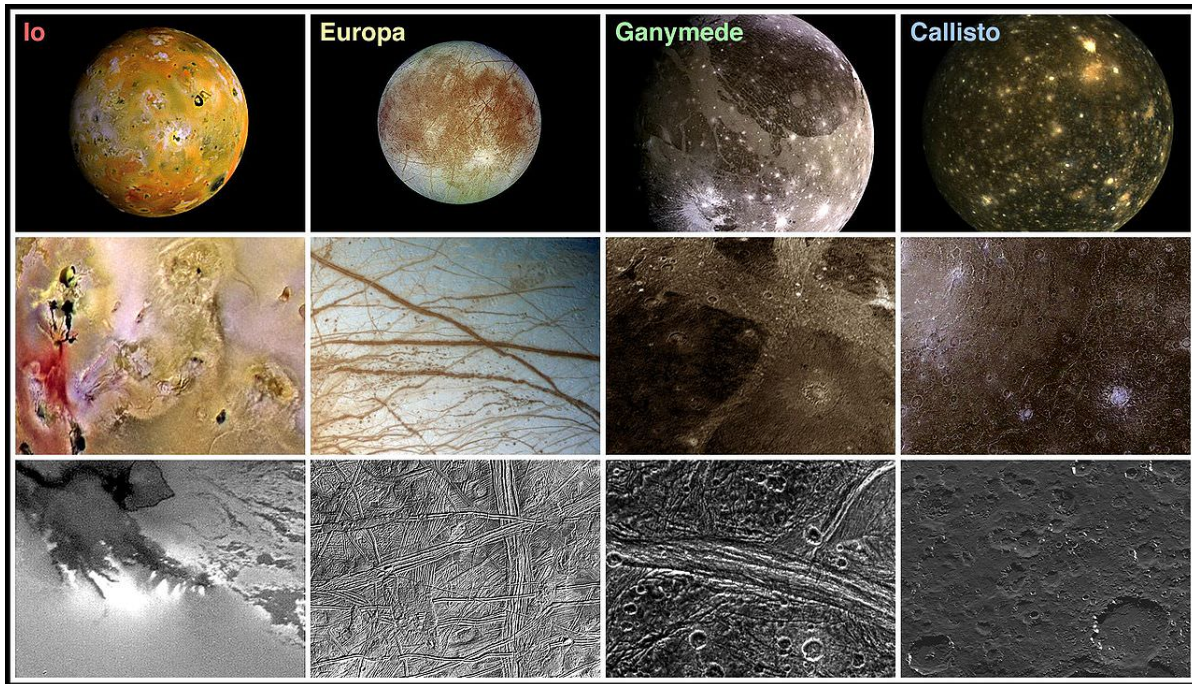
Dakle, temperatura planete je proporcionalna odnosu korena luminoznosti matične zvezde i rastojanja do te zvezde:

$$T \propto \sqrt[4]{\frac{L}{r^2}}.$$

S tim u vidu, znamo da na površini spoljašnjih planeta (i njihovih satelita) nećemo naći tečnu vodu. Doduše, imajući u vidu uglavnom gasni sastav i nedostatak čvrste površine, kao i ubitačne atmosferske uslove spoljašnjih planeta, jasno je da su šanse za razvitak života na njima izuzetno male. Njihovi sateliti, međutim, pokazuju naznake postojanja tečne vode ispod svoje površine, što daje legitimnu osnovu za njihovo dalje istraživanje.

3.4 Jupiterovi sateliti

Slika 5: Io, Evropa, Ganimed i Kalisto, [35]



Od 67 do sada poznatih Jupiterovih satelita, nama su naročito zanimljiva, zapravo, četiri najveća i najpoznatija: Io, Evropa, Ganimed i Kalisto (*Galilejevi sateliti*, slika 5). Naime, mereći njihove periode obilaska oko Jupitera, otkrivena je orbitalna

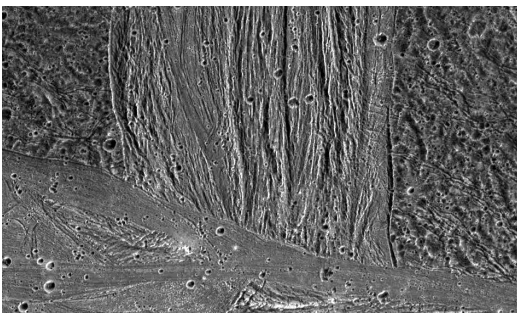
rezonanca između tri najbliža meseca — Ioa, Evrope i Ganimeda — u odnosu 4:2:1; ovo znači da za vreme za koje Ganimed obiđe svoju punu orbitu oko Jupitera, Evropa obiđe svoju dvaput, a Io svoju četiri puta.

Pošto su odnosi između orbitalnih perioda ovih meseca celi brojevi, matematički zaključak (koji je potvrđen posmatranjima) je da postoji “trenutak” (odnosno, određeni vremenski period) u kome su Io, Evropa i Ganimed kolinearni sa Jupiterom (svi su na istoj liniji). U takvim situacijama, gravitaciono međudejstvo dostiže svoj maksimum i dovodi do blage promene orbita satelita. Ova promena je u “prvoj iteraciji” relativno bezazlena; međutim, pošto se ovo dešava svaki put kad se sateliti “poravnaju”, njihove orbite postaju eliptičnije, što, naravno, utiče na gravitacionu interakciju svakog od pomenutih satelita sa Jupiterom: pošto su ekscentriciteti orbita veći, pericentri su na manjem rastojanju od Jupitera, a apocentri na većem, te je Jupiterova plimska sila — obrnuto proporcionalna trećem stepenu rastojanja — znatno jača u pericentru i znatno slabija u apocentru; štaviše, u pericentru je dovoljno jaka da podigne površinske slojeve satelita, koji potom, kako se satelit udaljava od Jupitera, padaju nazad. Ovi udari (stenovita ili ledena površina se velikom brzinom spušta i udara u donje slojeve) oslobađaju **velike količine toplote**; ova pojava se naziva *plimsko zagrevanje*.

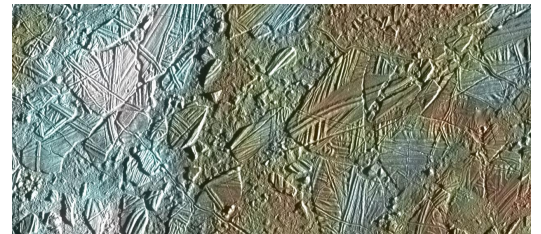
Na Iou, gde se površinski sloj stena podiže skoro 100m uvis, a onda silovito pada nazad, ovo dovodi do potpuno tečne unutrašnjosti i jakog vulkanizma na površini. Evropa, koja je na većem rastojanju od Jupitera i ima duplo duži orbitalni period, dobija manje toplote od udaraca površine o podslojeve (dešavaju se duplo ređe i slabiji su). Njena površina je zaleđena i glatka, bez nama poznatih planina ili kratera, ali je zato puna *linea* (dugačkih linija) koje se objašnjavaju podizanjem i spuštanjem površinskih slojeva i probijem toplijeg leda iz donjih slojeva na površinu. Pošto Evropa takođe nakuplja toplotu usled plimskog zagrevanja, sasvim je moguće da ispod površinskih slojeva leda postoji sloj koji se dovoljno zagrejao i prešao u tečno stanje — vodu. Štaviše, prema trenutnim modelima, to i očekujemo da nađemo. Letelica Galileo (1995–2003), namenjena istraživanju Jupitera i Galilejevih satelita, je merila varijacije u Evropinom gravitacionom polju i snimila njenu površinu; na osnovu dobijenih podataka, određena je gustina i raspored materije unutar satelita i ustanovljeno je da je u centru Evrope metalno (najverovatnije gvozdeno) jezgro, a iznad njega debeli sloj silikatnih stena. Iznad tog sloja trebalo bi da bude okean tečne vode, a iznad njega slojevi toplog i hladnog leda, respektivno. Dobijena gustina sloja u kome očekujemo tečnu vodu je $\sim 1\text{g/cm}^3$, tako da se u njemu može nalaziti bilo koja kombinacija čvrstog leda, tečne vode i poluotopljenog leda, ali opširnija analiza podataka sa Galileo letelice ukazuje na povećanu verovatnoću za nalazanje tečne vode u tom sloju.

Takođe, fotografije takozvanog *haotičnog terena** (slika 6) na Evropi pokazuju površinu prekrivenu nečim nalik na ledene bregove i grebene, ispresecane linijama koje podsećaju na ostatke vodene erozije, što znači da je možda dolazilo do probija tečne vode (kroz slojeve leda) na površinu, a potom njenog zamrzavanja. Takođe, nedostatak kratera na površini ukazuje na eroziju koja ih je vremenom izbrisala. Ovo je možda bila vodena erozija (u kom slučaju je voda svojim kratkim izdizanjem na površinu postepeno preoblikovala kratera). Osim toga, Galileo letelica je imala i magnetometar, koji je detektovao magnetno polje oko Evrope, indukovano Jupiterovim magnetnim poljem. Pošto indukcija zahteva protok naelektrisanih čestica, ovo ukazuje na postojanje provodnog sloja u unutrašnjosti Evrope. Ukoliko su modeli strukture tačni, tečna voda koju smo predvideli bi bila u kontaktu sa stenama koje su ispod nje, te bi se soli sa stena rastvarale u vodi i stvorile slani okean koji provodi struju, što bi dovelo do indukcije magnetnog polja koje smo neposredno detektovali.

Slika 7: reljef Ganimeda, [39]



Slika 6: haotični teren na Evropi, [38]



Slična situacija se uočava na Ganimedu. Pošto je on još udaljeniji od Jupitera, te su udari slabiji i oslobađaju znatno manje toplote, pretpostavlja se da je sloj tečnog okeana u dubljim unutrašnjosti (gde je pritisak veći), između dva sloja leda ili između leda i stenovitog sloja koji okružuje jezgro. Na površini Ganimeda takođe ima pukotina i linija (slika 7), ali, za razliku od Evrope, ima i dosta kratera. Ganimed je jedini nama poznat satelit koji ima sopstveno magnetno polje, za koje se pretpostavlja da potiče od tečnog sloja gvozdenog jezgra — koji bi trebalo da bude odmah ispod stena koje su u kontaktu sa vodom. Ovo bi mogao da bude dodatni izvor toplote koji bi nadomestio manjak plimskog zagrevanja. Takođe, Ganimed ima i (izuzetno razređenu) atmosferu (atmosferski pritisak je $\sim 1.2\mu\text{P}$).

Naposletku, Kalisto, koji je najudaljeniji od Jupitera i nije u orbitalnoj rezonanci sa preostala tri meseca, trpi zanemarljivo malo plimskog zagrevanja. Uprkos tome, podaci sa Galileo letelice ukazuju na mogućnost postojanja sloja tečne vode ispod površine, usendvičenog između ledene kore i stenovitog omotača jezgra.

Pritom, ni jezgro ni njegov omotač, izgleda, nisu diferencirani (nemaju slojeve), već se sastoje od stena izmešanih sa ledom (omotač), odnosno gvoždem (jezgro). Osim toga, interakcija Kalista sa Jupiterovim magnetnim poljem ukazuje, kao i

*Geološki, “haotičan teren” ili “haotičan reljef” je deo planete (ili drugog nebeskog tela) na kome se prepliću razni, naizgled nepovezani, oblici reljefa.

u Evropinom slučaju, na postojanje sloja provodne tečnosti, debelog barem 10km. Ovo bi mogao da bude okean tečne vode; međutim, usled nedostatka plimskog zagrevanja, jedini mogući izvor toplote (koja bi održavala vodu u tečnom stanju) je raspad radioaktivnih elemenata nakupljenih tokom formiranja samog satelita. Ovo bi mogao biti dodatni izvor toplote i na drugim Jupiterovim satelitima. Takođe, prisustvo amonijaka ili drugog “antifrizna” bi pomoglo održavanju potpovršinske vode u tečnom stanju.

Da bi saznali više o ovim satelitima i mogućnosti razvoja i opstanka života u njihovim unutrašnjostima, naučnici iz Nase ([44]) i Evropske svemirske agencije ([9]) planiraju zajedničku misiju koja podrazumeva slanje letelice JUICE (*JU*pter *IC*y *Mo*ons *Ex*plorer) na trogodišnje (ako ne i duže) istraživanje Evrope, Ganimeda i Kalista, s ciljem da temeljno mapira njihove površine, prouči fizičke karakteristike ledene kore na svakom od njih, otkrije imaju li tečnu vodu ispod površina, podrobno okarakterise strukturu i evoluciju njihovih unutrašnjosti i istraži Ganimedovu atmosferu i magnetno polje. Lansiranje ove letelice je predviđeno za 2020. godinu.

3.5 Titan i Enceladus

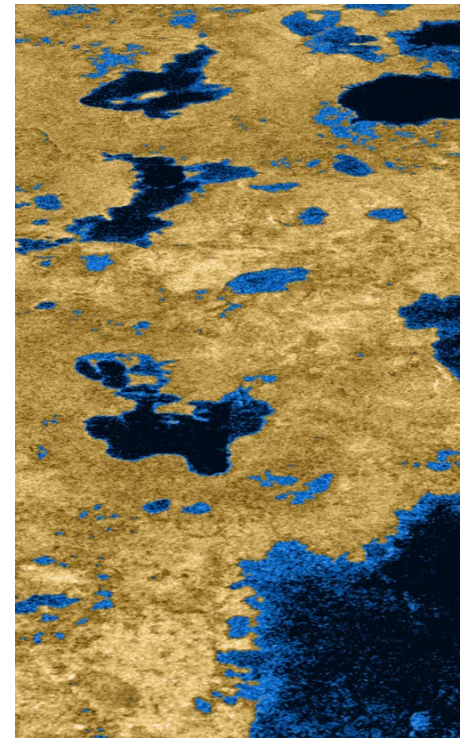
Dva od šezdeset i dva Saturnova satelita imaju upečatljive fizičke karakteristike koje predstavljaju solidnu osnovu za razmatranje mogućnosti postojanja života na njima. Jedan od njih je Titan, najveći Saturnov satelit, a drugi je Enceladus, koji je, sa albedom od 0.81 (prema [27]), jedno od najreflektivnijih tela u Sunčevom sistemu (nadmašuje ga samo Erida).

Titan je jedini satelit u Sunčevom sistemu koji ima izuzetno gustu, debelu atmosferu. Štaviše, jedino Venera ima deblju atmosferu od njega. Titanova atmosfera se sastoji od azota (94%), metana (~5.9%) i vodonika (~0.1%), sa tragovima etana, propana, acetilena i drugih ugljovodonika. Atmosferski pritisak je oko 1.5atm, ali je zato površinska temperatura, usled velike udaljenosti od Sunca i guste atmosfere koja blokira toplotu, oko -180°C . Jasno je da nema tečne vode na površini; međutim, atmosfera je očigledno bogata ugljenikovim jedinjenjima, koja uglavnom imaju znatno niže temperature mržnjenja od vode. Metan i etan su tečni na -180°C , što je upravo srednja temperatura Titana; visok atmosferski pritisak omogućava da ostanu tečni i na nižim temperaturama. Sasvim je moguće da na Titanu postoje jezera, pa čak i mora, tečnog metana ili etana. Štaviše, ona su maltene neophodna za teorijsko objašnjenje prisustva ogromne količine ugljovodonika, koju je *Voyager 1* otkrio 1980. Puna analiza podataka sa *Voyagera* otkrila je atmosferu bogatu azotom i raznolikim ugljovodonicima, što se objašnjava prisustvom amonijačnog leda i metana na površini. Kad amonijak prodre dovoljno visoko u atmosferu, sunčevo UV zračenje ga rastavlja na azot i vodonik, pri čemu azot, kao dovoljno masivan, ostaje u atmosferi, dok lagani vodonik odlazi u svemir — i tako dok ne nestane izvora amonijaka sa površine. Ista stvar bi trebalo da se dešava i sa metanom, koji se penje u atmosferu, biva rastavljen na vodonik i neki jednostavniji ugljovodonik (npr. metilen, CH_2); potom bi vodonik pobegao, a preostali ugljovodonik bi se vezao sa drugim atomima (ili jedinjenjima) ugljenika. Međutim, izvor metana na površini se još uvek nije iscrpio, jer novi metan stalno dospeva u atmosferu — što znači da mora postojati izuzetno veliki, tečni izvor koji sporo isparava. U ovakvoj situaciji, za razliku od amonijak-azot konverzije, dobar deo metana formira oblake i pada nazad na površinu u vidu kiše. Postojanje velikog broja jezera i reka (slika 8) na severnim i južnim delovima Titana je radarom potvrdio *Cassini* 2006.

Sada je trenutak zapitati se: da li je moguće zasnovati život na ugljeničnoj supstanci kao glavnom rastvaraču i transporteru materije? Za početak, čak iako su metan i etan tečni na -180°C , to je veoma niska temperatura u pogledu hemijskih reakcija neophodnih za život; veliki broj njih bi se znatno usporio, što značil da bi bilo kakav živi svet na Titanu morao da ima izuzetno spor metabolizam. Uz to, metan i etan su dosta slabiji rastvarači od vode, tako da bi se hemijska raznovrsnost reakcija u organizmu morala primetno smanjiti. Sve u svemu, ovakav život na Titanu bi bio zasnovan na potpuno drugačijoj hemiji i funkcionisao na drugačiji način od života za koji znamo i koliko god da je to zanimljiva mogućnost, to ne menja činjenicu da su šanse male.

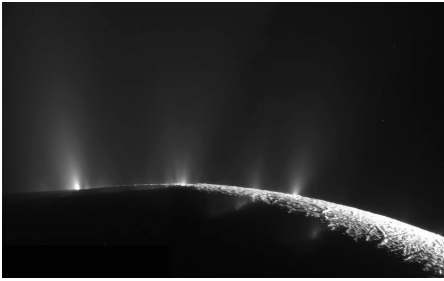
Cassini je našao i neočekivane zanimljivosti na Enceladusu. Pored toga što ima glatku ledenu površinu koja reflektuje 80% svetlosti koju primi, magnetometar je otkrio “nešto što odguruje Saturnovo magnetno polje” (prema [33]) početkom 2005. Odmah se posumnjalo na atmosferu; međutim, ispostavilo se da je Enceladusova atmosfera *lokalnog* karaktera — gasovi su najgušći u južnom polarnom regionu i njihova gustina naglo opada sa udaljavanjem od pola. Početkom 2006. objašnjeno je zašto: *Cassini*jeve fotografije južnog pola pokazuju mlazove zaleđenih čestica koji bivaju izbačeni u svemir ogromnim brzinama (slika 9) — gotovo poput gejzira na Zemlji. Kako je mogućnost “oduvavanja” čestica sa površine usled spoljašnjih faktora nemoguća (pri brzini od 400m/s), zaključeno je da, šta god da je Enceladus izbacio, mora da je došlo iz njegove unutrašnjosti.

Slika 8: jezera na Titanu, [40]



Par meseci kasnije određen je hemijski sastav njegove “lokalne atmosfere” — utvrđeno je da je preko 90% izbačenog materijala **vodena para**, dok je ostatak sačinjen od molekuskog azota, metana i ugljen-dioksida.

Slika 9: geiziri na Enceladusu, [41]



Kao dodatak svemu tome, na ledenoj površini Enceladusa uočene su “pruge” — skoro paralelna linearna udubljenja tamnija od okolne površine, u blizini južnog pola. Pomenuta otkrića, kao i povećana temperatura ovih udubljenja (pretpostavljena po njihovoj tamnijoj boji) i činjenica da Enceladus, poput Evrope, ima uglavnom glatku površinu (sa koje su udarni krateri obrisani) ukazuju na eroziju, kao i na to da su “pruge” relativno mlade. Jedina teorija koja sve ovo objašnjava jeste da Enceladus ima “džep” tečne vode ispod površine svog južnog pola. Pošto količina toplote koju dobija od plimskog zagrevanja nije dovoljna da održi vodu tečnom dovoljno dugo (da je samo plimsko zagrevanje izvor toplote, sva tečna voda bi se zaledila do sad), pretpostavlja se da je raspad kratko-živećih radioaktivnih izotopa aluminijuma, gvožđa ili mangana u prošlosti dodao toplotu koja je održala vodu u tečnom stanju. Ako je voda još i dovoljno topla da podrži relativno brze hemijske reakcije, postoje realne šanse da se u uskom sloju Enceladusove površine razvije (ili već postoji) život.

4 Život van Sunčevog sistema: tehnike otkrivanja ekstrasolarnih* planeta

Do pre tridesetak godina, spisak svih planeta za koje znamo imao je devet članova (bez Plutona, osam). Prema teoriji kondenzacije, usled načina na koji se zvezde formiraju, sasvim je očekivano da će neke od njih (u zavisnosti od uslova u oblaku međuzvezdane materije) imati planetarne sisteme; i zaista, ubrzo nakon početka potrage za *ekstrasolarnim planetama* (krajem osamdesetih godina prošlog veka), teorija se pokazala kao tačna. Naše prvo otkriće (u januaru 1992.) donelo je *dve* (a dve godine kasnije i treću) stenovite egzoplanete koje rotiraju oko pulsara PSR B1257+12 u sazvežđu Device. 1995. godine otkrivena je egzoplaneta 51 Pegasi b, koja orbitira oko zvezde na glavnom nizu — zvezde nalik na Sunce, 51 Pegasi, udaljene oko 51 s.g.

Tehnike koje koristimo za detekciju ekstrasolarnih planeta mogu se grubo podeliti na direktne i indirektno; direktne podrazumevaju fotografije planete ili spektar primljen od nje kao neposredan dokaz njenog postojanja, dok indirektno analiziraju karakteristike matične zvezde i na osnovu pronađenih nepravilnosti dovode do zaključka da zvezda ima pratioca (i da je taj pratilac planeta). Pošto su planete mnogo manje sjajne od matičnih zvezda, uvek je lakše koristiti se indirektnim metodama; većina egzoplaneta za koje znamo je otkrivena upravo tim metodama.

4.1 Metod tranzita i pomračenja

Tehnika pomoću koje je otkriven ubedljivo najveći broj ekstrasolarnih planeta (oko 2730) je tzv. tehnika *tranzita*: kada planeta (na svojoj orbiti) prođe “ispred” matične zvezde (*tranzit* planete, slika 10) — u pravcu ka posmatraču — sjaj zvezde (a samim tim i sjaj sistema zvezda-planeta) se vrlo malo smanji. Tu malu promenu u sjaju možemo izmeriti i zaključiti da zvezda ima pratioca; taj pratilac može biti i druga zvezda — međutim, promena sjaja zvezde je znatno manja kada ispred nje prolazi planeta (zvezde, koje su veće od planeta, blokiraju mnogo veći deo površine zvezde ispred koje prolaze, pa joj više smanjuju sjaj). Iz krive sjaja[†] mogu se zaključiti orbitalni period i radijus planete.

Ako beležimo spektar primljen od matične zvezde tokom tranzita — pod pretpostavkom da je međuzvezdana sredina potpuno prozirna — na osnovu smanjenog intenziteta zračenja u određenom području možemo pretpostaviti da je atmosfera planete apsorbovala “deo koji fali” i na osnovu toga zaključiti kakav je njen sastav. Naravno, iz raznih razloga (međuzvezdana sredina nije prozirna, ne znamo ni da li planeta ima atmosferu, ne znamo da li je svetlost apsorbovana ili rasejana), ova pretpostavka se može pokazati netačnom. Ovo je jedna od mana indirektnih metoda.

Nakon prolaska polovine perioda (mereno od tranzita), planeta zalazi “iza” matične zvezde (*pomračenje* planete); i tada je ukupan

Slika 10: tranzit Venere preko Sunca u junu 2004. [preuzeto iz [1], str. 374]



* Ekstrasolarne planete ili egzoplanete (eng. *exoplanet*) su planete van Sunčevog sistema.

[†] Kriva sjaja je grafik zavisnosti sjaja od vremena.

sjaaj sistema manji, s tim što je promena sjaja još manja nego u prethodnom slučaju. Međutim, znajući da planete uglavnom zrače u infracrvenom delu spektra, ako možemo izmeriti promenu infracrvenog sjaja, možemo zaključiti koliki postotak infracrvenog zračenja sistema potiče od planete, na osnovu čega možemo izračunati njenu temperaturu pomoću Plankovog zakona. Ako pritom znamo masu matične zvezde, iz trećeg Keplerovog zakona možemo dobiti veliku poluosu planetarne orbite (njeno prosečno rastojanje do zvezde):

$$\frac{a^3}{P^2} \approx \frac{G}{4\pi^2} m_*,$$

a ako nam je poznata i brzina kretanja zvezde oko centra mase sistema, možemo izračunati i masu planete primenom zakona održanja impulsa:

$$m_* v_* = m_p v_p \Rightarrow m_p = \frac{m_* v_*}{v_p} = \frac{m_* v_* P_p}{2a\pi}.$$

Na osnovu mase, radijusa, temperature i udaljenosti od matične zvezde možemo proceniti da li je planeta stenovita (da li ima čvrstu površinu), koje su šanse za postojanje tečne vode na njenoj površini ili u unutrašnjosti, kakvi su atmosferski uslovi...

Ovaj metod, doduše, funkcioniše samo ako su planeta i zvezda u pravcu vizure (ako je $i \approx 0^\circ$). Nasina letelica Kepler, lansirana u heliocentričnu orbitu u martu 2009. godine, s ciljem da otkriva egzoplanete metodom tranzita, je zaslužna za više od 80% (oko 2730) planeta otkrivenih ovom tehnikom (prema [29])[†].

4.2 Doplerovska spektroskopija i astrometrija

Iako nam se čini da se u Sunčevom sistemu planete kreću oko Sunca, dok Sunce miruje u centru, zapravo se i planete i Sunce kreću oko *centra mase* (*baricentra*) sistema, čiji položaj zavisi od rasporeda mase u sistemu, odnosno položaja planeta, malih tela i Sunca. Najmasivniji objekti imaju najveći uticaj na položaj baricentra — on će biti najbliži najvećoj koncentraciji mase. Kad bi Sunce bilo usamljena zvezda (bez planetarnog sistema), centar mase bi bio u centru Sunca; međutim, oko Sunca orbitira osam planeta i mnogo drugih malih tela, te je baricentar Sunčevog sistema izmešten u odnosu na centar Sunca. Pošto se i Sunce i planete stalno kreću, i centar mase se stalno kreće (kretanjem nebeskih tela se menja raspored mase sistema, pa se i položaj baricentra menja prema tom kretanju). Sunce, kao najmasivniji objekat u sistemu, ima najveći uticaj na kretanje baricentra i on je uvek najbliži Suncu (uglavnom je tik izvan Sunčeve površine).

Imajući to u vidu, ako bi hipotetički astronomi sa nekog dalekog sveta hteli da provere ima li planeta oko Sunca, oni bi, uz dovoljno precizna merenja, mogli da uoče kretanje Sunca (umesto da miruje, Sunce se kreće po elipsi oko baricentra) i da zaključe da je ono izazvano postojanjem drugih tela u Sunčevoj blizini. Ako bi Sunčeva putanja oko baricentra bila znatno veća od Sunčevih dimenzija, to bi značilo da je Sunčev pratilac druga zvezda; ako bi pak njegova putanja bila uporediva sa njegovim dimenzijama, to bi značilo da je gravitacioni uticaj na Sunce mali i da Sunce za pratioca ima planetu (ili više njih). Isto tako, astronomi na Zemlji mogu da uoče i mere kretanje drugih zvezda i na osnovu njega zaključe da te zvezde imaju planete ili planetarne sisteme.

Kretanje zvezde oko baricentra uzrokuje vrlo malo odstupanje njenog sopstvenog kretanja od prave linije (zvezda odstupa od svog prosečnog položaja). Korišćenje sopstvenog kretanja za detekciju ekstrazolarnih planeta naziva se *astrometrijska tehnika*. Ovaj metod zahteva vršenje veoma preciznih merenja koja često traju i po nekoliko decenija (jer masivne planete, koje imaju najveći uticaj na kretanje matične zvezde, uglavnom imaju dug orbitalni period), te se koristi ređe od svoje alternative — *doplerovske spektroskopije*. Pošto orbitalno kretanje zvezde podrazumeva njeno periodično približavanje i udaljavanje od posmatrača, u spektru zvezde se uočavaju mali periodični pomaci ka crvenom i ka plavom; opet, na osnovu veličine pomaka možemo zaključiti postojanje jedne ili više planeta oko zvezde, jer znamo da planete imaju znatno manji uticaj na kretanje zvezde nego što bi imala druga zvezda. Iz izmerenih pomaka možemo zaključiti koliko ima planeta i dedukovati njihove orbitalne karakteristike i masu. Doduše, pošto inklinacija orbitalne ravni utiče na pomak linija u spektru, a inklinaciju, osim u specifičnim slučajevima, ne možemo izmeriti, izračunata orbitalna brzina i masa planete će biti donje granice njene stvarne orbitalne brzine, odnosno mase. Osim toga, kod zvezde čija je inklinacija $\approx 90^\circ$ neće biti doplerovskog pomaka, pošto nema kretanja zvezde u pravcu vizure.

4.3 Druge tehnike

Pored pomenutih, posebna mogućnost za detekciju planeta se javlja kada je matična zvezda pulsar; ovako su otkrivene prve egzoplanete. Metod se zasniva na preciznom merenju promena perioda impulsa koje dobijamo od pulsara (planeta izaziva periodične promene pulsacija).

Jedan od relativno novih metoda je tzv. *metod gravitacionog mikrosočiva*. Efekat gravitacionog sočiva, koji je predviđen klasičnom teorijom gravitacije, ali precizno formulisan tek Anjštajnovom teorijom generalne relativnosti, je zapravo “savijanje”

^{*}Inklinacija i je nagib orbitalne ravni nebeskog tela u odnosu na *referentnu ravan* koja sadrži pravac vizure.

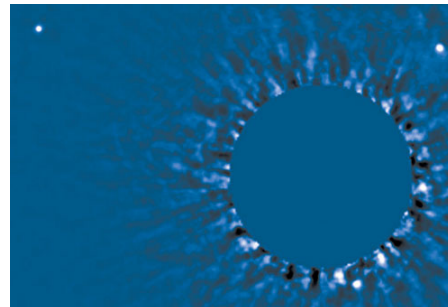
[†]Svi navedeni podaci vezani za broj potvrđenih egzoplaneta preuzeti su iz [29] 1. maja 2017. (izuzev gde je napomenuto drugačije).

svetlosti (promena njene putanje) usled prisustva materije između izvora i posmatrača. Materija koja je prisutna svojom masom dovodi do krivljenja prostor-vremena, pa svetlost, koja se u njemu kreće, i sama biva iskrivljena.

Ovo znači da svetlost od neke udaljene zvezde koja (na putu do Zemlje) prolazi pored zvezde sa planetom ili planetarnim sistemom biva iskrivljena usled gravitacionog dejstva zvezde i planeta. Pošto planete, koje su mnogo manje mase od zvezda, imaju manji uticaj na svetlost, ovaj efekat se naziva gravitaciono mikrosočivo. Na osnovu iskrivljenja svetlosti usled mikrosočiva možemo zaključiti postojanje planete i njenu masu i udaljenost od matične zvezde. Ovom tehnikom je dosad detektovano oko 40 ekstrasolarnih planeta.

Da bismo neposredno detektovali planetu, moramo primiti svetlost direktno od nje (fotografisati je ili primiti njen spektar). Posmatranja je najbolje vršiti u infracrvenom delu spektra, pošto planete zrače uglavnom infracrvenu svetlost, dok samo najhladnije zvezde imaju maksimum zračenja u infracrvenoj oblasti. Upotreba koronografa (uređaja koji blokira direktnu svetlost zvezde, slika 11) je neophodna. Uz svu ovu pomoć, fotografisanje egzoplaneta i izolovanje njihovih spektara ostaje izuzetno problematično, najviše zato što su zvezde drastično sjajnije od planeta i zato što su svi ti sistemi veoma daleko od nas. Direktnom tehnikom je do sada detektovano oko 50 egzoplaneta.

Slika 11: fotografija dve planete (levi i desni ugao) oko zvezde HR8799, koja je zaklonjena koronografom (preuzeto iz [1], str. 375)



4.4 Zemljolike planete

Skoro 3500 dosad potvrđenih egzoplaneta (3490 od 1. juna 2017.), one čije mase znamo mogu se svrstati u:

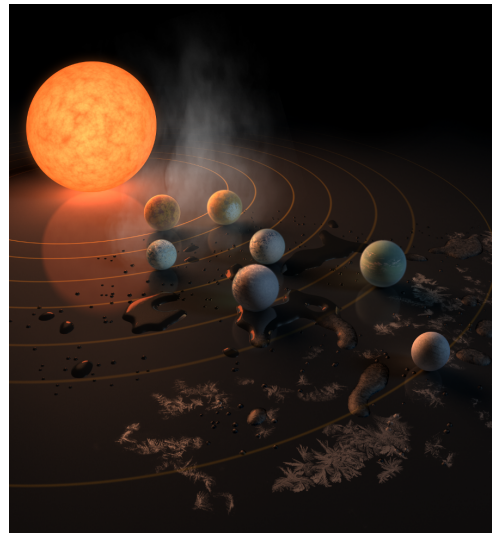
- planete Jupiterovog tipa (mase kao Jupiter ili veće)
- planete Neptunovog tipa (mase 10 do 30 puta veće nego Zemlja)
- *super-Zemlje* (do deset Zemljinih masa)
- zemljolike (do $1.5m_{\oplus}$)

Ostali intervali masa (između 30 i 320 Zemljinih masa) potpadaju pod kategoriju planeta koje nisu nalik ni na jednu planetu Sunčevog sistema (jer takvih planeta u Sunčevom sistemu nema). Oko 2200 planeta još uvek ima nepoznatu masu.

Na osnovu radijusa planete možemo izračunati njenu zapreminu; uz masu, znamo i gustinu planete, koju, poredeći sa gustinom planeta Sunčevog sistema, možemo iskoristiti za procenu sastava: stenovite planete (poput Zemlje) imaju znatno veću gustinu od gasovitih (poput Jupitera). Iz mase i radijusa takođe procenjujemo površinsku gravitaciju, koja nam može pomoći da pretpostavimo ima li planeta atmosferu ili ne. Uz ovo i druge indikatore atmosfere možemo proceniti atmosferski pritisak; ukoliko znamo i luminoznost matične zvezde, pa samim tim i temperaturu planete, imamo dovoljno informacija za procenu mogućnosti postojanja tečne vode na površini. Naravno, pošto su sve planete koje smo detektovali veoma daleko, zaključci koje izvodimo zadržani su na nivou procene i verovatnoće; opet, uzevši u obzir činjenicu da smo pre svega tridesetak godina počeli da tragamo za egzoplanetama, daleko smo dogurali.

Većina egzoplaneta Jupiterovog tipa su mnogo bliže matičnim zvezdama nego naš Jupiter Suncu — uglavnom i bliži nego Merkur Suncu — i veoma topli; zato su prozvani “vreli Jupiteri”. Zbog toga, kao i zbog uglavnom gasovitog sastava, njih izbacujemo sa spiska potencijalno nastanjivih planeta. Sledeći (po masi i veličini) tip, Neptunov tip, se zasad najčešće javlja; ove planete su reda veličine Urana ili Neptuna, ali su, opet, znatno bliže matičnim zvezdama — uglavnom su unutar 1 A.J. Zato su, poput prethodnog tipa, prozvani “vreli Neptuni”, te ih takođe isključujemo. Ostaju nam super-Zemlje i zemljolike, među kojima ima 13 kandidata za nastanjive planete (datih u sledećoj tabeli, sastavljenoj pomoću [29]).

Slika 12: slikovit prikaz sistema TRAPPIST-1 i njegove nastanjive zone, [42]



naziv	tip	$m [m_{\oplus}]$	$R [R_{\oplus}]$	$P [d]$	$a [A.J.]$	$T_* [K]$
Gliese 1214 b	super-Zemlja	6.304	2.678	1.58	0.01411	3170
Gliese 667 Cc	super-Zemlja	3.84	1.54	28.14	0.125	3350
Kepler-62f	super-Zemlja	2.8	1.41	267.291	0.718	4925
Kepler-62e	super-Zemlja	4.5	1.61	122.3874	0.427	4925
Kepler-186f	zemljolika	1.4	1.17	129.9441	0.432	3755
Kepler-442b	super-Zemlja	2.3	1.34	112.3053	0.409	4402
Kepler-452b	super-Zemlja	5	1.5	384.843	1.046	5757
Kepler-1229b	super-Zemlja	2.7	1.4	86.828989	0.222992	3784
TRAPPIST-1e	zemljolika	0.624	0.918	6.099615	0.02817	2559
TRAPPIST-1f	zemljolika	0.6848	1.045	9.20669	0.0371	2559
TRAPPIST-1g	zemljolika	1.3504	0.1005	12.35294	0.0451	2559
Wolf 1061c	super-Zemlja	3.4336	1.6	17.8719	0.089	3342
Proxima Centauri b	zemljolika	1.28	0.8	11.186	0.0485	3050

Sve ove planete su unutar nastanjive zone svojih matičnih zvezda (određene temperaturom planete pod pretpostavkom da je atmosferski pritisak sličan Zemljinom), što znači da sve one možda imaju tečnu vodu. Gliese 1214 b, kojoj je nadenut nadimak “okeanski svet”, možda ima vodeno jezgro, okruženo stenama i vodom, sa debelom atmosferom punom oblaka (ovo je zaključeno na osnovu spektroskopskih rezultata); pritom, prilično je blizu (udaljena 42 s.g.), te je trenutno među najzanimljivijima za proučavanje. Takođe, nedavno otkriven sistem TRAPPIST-1 (slika 12), čije su tri planete zemljolike, ima u centru *ultrahladnog patuljka* čija je efektivna temperatura oko 2550K, zbog čega je njegova nastanjiva zona na mnogo manjem rastojanju u odnosu na većinu matičnih zvezda drugih planeta iz tabele.

5 Potraga za inteligentnim životom

Sva dosadašnja istraživanja i zaključci polaze od jednostavnog ka složenom, uzimajući u obzir veliku verovatnoću da će živa bića, ako ih nađemo van Zemlje, biti verovatno jednoćelijski ili prosti višećelijski organizmi, jer je od toga počeo i život na Zemlji. Međutim, fizičar Enriko Fermi (1901-1954) je ovom pitanju prišao sa suprotne strane: polazeći od pretpostavke da su civilizacije poput naše česte, zapitao se gde su sve one i zašto nismo dobili nikakve poruke od njih, nikakve naznake da su tu.

Kako uopšte proceniti šanse za postojanje inteligentne, tehnološki napredne i komunikacije željne civilizacije drugde u Galaksiji? Frenk Drejk je pokušao da da odgovor na ovo pitanje formulisanjem jednačine čije je rešenje verovatan broj naprednih civilizacija u Galaksiji; ova jednačina, formulisana 1961. godine, poznata je kao **Drejkova jednačina**:

$$N = R_* \times f_p \times n_e \times f_l \times f_i \times f_c \times L,$$

gde je

- R_* — prosečna stopa rađanja zvezda u Galaksiji (trenutna količina zvezda podeljena starošću Galaksije)
- f_p — procenat zvezda koje imaju planetarne sisteme
- n_e — broj nastanjivih planeta u tim planetarnim sistemima
- f_l — procenat nastanjivih planeta na kojima nastane život
- f_i — broj planeta na kojima je život evoluirao do inteligentnog života
- f_c — broj inteligentnih društava koja se razviju u tehnološki napredne civilizacije
- L — prosečan životni vek jedne takve civilizacije i
- N — rešenje jednačine: broj tehnološki naprednih civilizacija prisutnih u Galaksiji u datom vremenu.

Svi faktori u jednačini su pitanje proseka i verovatnoće i zahtevaju pažljivo razmatranje i analizu. Vrednost R_* mora se ograničiti na zvezde koje imaju dovoljno dug stabilan period, da bi potencijalni život na planetama oko njih imao dovoljno vremena da se razvije; životu na Zemlji je bilo potrebno skoro četiri milijarde godina da dođe do svog trenutnog stupnja, pa ćemo to pretpostaviti i za minimalan životni vek odgovarajuće zvezde — stoga, iz statistike isključujemo zvezde masivnije od oko $1.5m_{\odot}$, odnosno

zvezde klasa O, B i A. Ostaju nam zvezde spektralnih klasa F, G, K i M, koje čine ukupno 98.5% zvezda u Galaksiji. Kako Galaksija broji minimum sto milijardi zvezda, a njena starost je 13.21 milijardi godina, dobijamo

$$R_* = 0.986 \times \frac{100 \times 10^9}{13.21 \times 10^9} \approx 7.5 \text{ zvezda godišnje.}$$

U skladu sa onim što smo dosad imali prilike da posmatramo, većina zvezda u okviru klasa F, G, K i M je imala planete, te ćemo proceniti $f_p = 1$; što se tiče njihove nastanjivosti, pogledajmo 13 planeta koje se nalaze u nastanjivim zonama matičnih zvezda. TRAPPIST-1 sistem ima tri takve planete, Kepler-62 ima dve, a preostalih 11 ima po jednu; prosek toga je

$$n_e = \frac{3 + 2 + 11}{13} = 1.231.$$

Nakon ovog faktora sve ostale možemo samo nagađati, jer nemamo podatke iz kojih bismo izvukli verovatnoće. Ono što možemo da kažemo jeste da evolucija vodi do inteligencije, tako da, ako se pojavi život (za šta ćemo dati šansu $f_l = 0.5$), pojaviće se i inteligencija ($f_i = 1$). Hoće li ta civilizacija postati tehnološka — ne znamo, ali na osnovu naše civilizacije i njenog prirodnog puta ka tehnologiji stavljamo $f_c = 1$; ako uzmemo još prosečan ljudski životni vek $L \approx 85$ godina, dobijamo sledeći odgovor*:

$$N = 7.5 \times 1 \times 1.231 \times 0.5 \times 1 \times 1 \times 85 = 392.381.$$

SETI Institut (*Search for ExtraTerrestrial Intelligence*) već skoro 40 godina (prema [30]) napeto sluša galaktički radio u potrazi za vanzemaljskim porukama, ali ne nalazi ništa. Prema gornjim proračunima bi trebalo da ima skoro 400 inteligentnih civilizacija razmazanih po našoj Galaksiji, tražeći nas kao što mi tražimo njih. Ali, ako je tako, gde su svi?

Ovo rezonovanje naziva se Fermijev paradoks. Ne postoji jasno razrešenje za njega, ali su naučnici davali razna potencijalna objašnjenja — od toga da postoji nekakav “veliki filter” kroz koji jako mali broj civilizacija izvuče živu glavu (i šta bi sve taj filter mogao biti) — preko mogućnosti da upoznavanje drugih vrsta ne interesuje civilizacije naprednije od naše, da je cela Galaksija kolonizovana ali smo mi pozicionirani “na selu”, gde nema nikog, ili da su druge civilizacije već posetile Zemlju, ali mnogo ranije (pre postanka čoveka) i zaključile da nema ničega od interesa na njoj — do koncepata predatorske civilizacije od koje se sve ostale kriju ili koja je istrebila sve ostale i sprema se da istrebi nas. Naravno, uvek postoji mogućnost da naši instrumenti nisu dovoljno precizni, ili da slušamo pogrešne stvari, ili da još uvek ne znamo šta čujemo (iako mislimo da znamo).

Koliko god uzbudljivo bilo razmišljati na ovaj način, rešavanje Drejkove jednačine je više nagađanje nego statistika. Vrednosti poslednja četiri faktora u jednačini su neosnovane pretpostavke i ne mogu se smatrati tačnim. Ipak, s jedne strane je sasvim logično da će i za mnogo manje verovatnoće u jednačini broj civilizacija biti relativno velik — prosto zato što ima toliko mnogo zvezda samo u našoj Galaksiji. Ako uzmemo u obzir obližnje galaksije — ili čitav svemir koji možemo da vidimo — deluje zaista neverovatno da među svim tim zvezdama nema baš nijedne koja ima zemljoliku planetu i ljude na njoj. Pored toga, značaj Drejkove jednačine leži u podeli ovog složenog i značajnog pitanja na delove čija rešenja možemo dokučiti nezavisno, u okviru različitih naučnih disciplina.

6 Zaključak

Iako ništa nije potvrđeno ni sigurno, mogućnost da ima živih bića drugde u Galaksiji, pa i u ostatku svemira, definitivno postoji — štaviše, oslonimo li se barem malo na Drejkovu jednačinu, verovatnoća da sretnemo čitave civilizacije uopšte nije zanemarljiva. Uprkos udaljenosti sistema koje posmatramo i nepreciznosti instrumenata kojima se služimo, uspevamo da saznamo neverovatno mnogo; ako nauka i tehnologija nastave da prate eksponencijalni razvoj, kroz par decenija ćemo imati preciznije tehnike i moćnije uređaje koji će odgovoriti na naše pitanje: jesmo li sami u kosmosu?

*Dobijeno rešenje za N je autorka rada sama izračunala, pozivajući se na zaključke sopstvenog rada i korišćene literature. Mnogi naučnici su, kroz istoriju, davali svoje procene, s tim što, usled već pomenutih razloga, još uvek nije moguće dati jedinstveno niti tačno rešenje Drejkove jednačine.

7 Literatura

- [1] Bennett, Jeffrey and Shostak, Seth: *Life in the Universe*, Pearson Education, 2012.
- [2] Chaisson, Eric and McMillan, Steve: *Astronomy Today*, Pearson Education, 2014.
- [3] Close, Laird: *The Great Courses: Life in Our Universe*, 2013.
- [4] Vukićević-Karabin Mirjana, Atanacković Olga: *Opšta astrofizika*, Zavod za udžbenike, 2010.
- [5] public.media.smithsonianmag.com/legacy_blog/bacteria-2.jpg — *Smithsonian Magazine*
- [6] media1.britannica.com/eb-media/78/160278-004-649F9BF0.jpg — *Encyclopaedia Britannica*
- [7] news.nationalgeographic.com/news/2008/10/081007-super-worms.html — *National Geographic*
- [8] lasp.colorado.edu/home/missions-projects/quick-facts-kepler — *Laboratory for Atmospheric and Space Physics, University of Colorado Boulder*
- [9] <http://sci.esa.int/juice/> — *European Space Agency*

Wikipedia, The Free Encyclopedia:

- [10] en.wikipedia.org/wiki/Extinction
- [11] en.wikipedia.org/wiki/Extremophile#Classifications
- [12] en.wikipedia.org/wiki/Mule#Fertility
- [13] en.wikipedia.org/wiki/Virus#Life_properties
- [14] en.wikipedia.org/wiki/Mercury
- [15] en.wikipedia.org/wiki/Venus
- [16] en.wikipedia.org/wiki/Earth
- [17] en.wikipedia.org/wiki/Mars
- [18] en.wikipedia.org/wiki/Jupiter
- [19] [en.wikipedia.org/wiki/Galileo_\(spacecraft\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Galileo_(spacecraft))
- [20] en.wikipedia.org/wiki/Io
- [21] en.wikipedia.org/wiki/Europa
- [22] en.wikipedia.org/wiki/Ganymede
- [23] en.wikipedia.org/wiki/Callisto
- [24] en.wikipedia.org/wiki/Saturn
- [25] en.wikipedia.org/wiki/Cassini-Huygens
- [26] en.wikipedia.org/wiki/Titan
- [27] en.wikipedia.org/wiki/Enceladus
- [28] en.wikipedia.org/wiki/List_of_exoplanets
- [29] [en.wikipedia.org/wiki/List_of_exoplanets_\(full\)](http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_exoplanets_(full))
- [30] en.wikipedia.org/wiki/Search_for_extraterrestrial_intelligence

National Aeronautics and Space Administration:

- [31] www.nasa.gov/sites/default/files/thumbnails/image/iss044-e-45215.jpg

- [32] www.nasa.gov/sites/default/files/images/465923main_water_bear.jpg
- [33] saturn.jpl.nasa.gov/the-journey/timeline/
- [34] solarsystem.nasa.gov/galileo/mission/index.cfm
- [35] photojournal.jpl.nasa.gov/jpegMod/PIA00600_modest.jpg
- [36] www.nasa.gov/images/content/1385main_MM_Image_Feature_17_rs4.jpg
- [37] www.nasa.gov/images/content/458463main_pia13163.jpg
- [38] photojournal.jpl.nasa.gov/jpeg/PIA01127.jpg
- [39] wesfiles.wesleyan.edu/courses/astr103/Lectures/brighttjunct.jpg
- [40] www.nasa.gov/sites/default/files/images/166569main_image_feature_732_jw_full.jpg
- [41] www.nasa.gov/sites/default/files/thumbnails/image/main_pia11688.jpg
- [42] www.nasa.gov/sites/default/files/thumbnails/image/4_cover_pia21421-png.png
- [43] www.nasa.gov/mission_pages/kepler/overview/index.html
- [44] <https://science.nasa.gov/missions/juice>