

UNIVERZITET U BEOGRADU

---

MATEMATIČKI FAKULTET

**Metode detekcije ekstrasolarnih planeta**

**SEMINARSKI RAD**

Predmet: Opšta astrofizika

Student:

Svetislav Grujić

AF 66/07

Profesor:

dr Olga Atanacković

---

Beograd, 2009.

# SADRŽAJ

UVOD .....	3
1. Metode detekcije ekstrasolarnih planeta.....	4
1.1. Astrometrija .....	5
1.2. Metoda radijalnih brzina .....	6
1.3. Mikrofokusiranje (gravitaciona sočiva) .....	8
1.4. Metoda pomračenja (fotometrijska metoda) .....	10
1.5. Merenje perioda pulsara .....	11
1.6. Direktno snimanje .....	12
ZAKLJUČAK .....	14
LITERATURA .....	15

## UVOD

Da li planete kruže i oko drugih zvezda? Da li je Sunčev sistem jedinstven ili je Galaksija puna planeta? Da li na tim planetama, ukoliko ih ima, postoji život? Da li postoje inteligentna bića, civilizacije poput naše a možda čak i naprednije? Ova i slična pitanja vekovima su mučila ljude i zaokupljala njihove misli dok su u tamnim noćima posmatrali beskonačno nebesko prostranstvo prepuno zvezda.

Prvi pokušaji da se odgovori na ova pitanja potiču iz stare Grčke (Demokrit, Epikur...). Kasnije su i mnogi veliki mislioci poput Đordana Bruna, Kanta i Getea pokušali da rasvetle misteriju drugih svetova, ali su to bile samo teorije koje je bilo nemoguće proveriti. Prvi ozbiljan pokušaj da se detektuje ekstrasolarna<sup>1</sup> planeta načinio je Hajgens (Huygens) u 17. veku. Međutim, ubrzo je shvatio da svojim skromnim teleskopom ne može postići dovoljno precizna posmatranja koja su u ovom slučaju od velikog značaja. Početkom 20. veka pojavila se nova nada nakon primene astrometrijske i spektroskopske metode za detekciju zvezda vrlo slabog sjaja. Načinjeni su prvi pokušaji da se ovim metodama detektuje planeta ali, nažalost, zbog male preciznosti instrumenata, nisu urodili plodom. Još jedan tračak nade javio se 1950. godine kada je holandski astronom Peter Van De Kamp objavio detekciju planete oko Barnardove zvezde<sup>2</sup>. Ispostavilo se da je greška instrumenta prouzrokovala pojave koje su pogrešno protumačene kao prisustvo planete u orbiti zvezde.

Posle mnogih bezuspešnih pokušaja, 1990. godine Frejl (Frail) i Volscan (Wolszczan) su radio teleskopom na opservatoriji Arecibo otkrili prvu ekstrasolarnu planetu koja kruži oko milisekundnog pulsara PSR B1257+12. Otkriće je bila prava senzacija, ali i malim delom razočarenje jer planeta kruži oko „mrtve“ zvezde pa na njoj gotovo sigurno nema života. Naravno, to nije sprečilo dalje traganje za planetama, tako da već 1995. godine švajcarski astronomi Mičel Mejor (Michel Mayor) i Didier Kueloc (Didier Queloz) otkrivaju planetu oko zvezde 51 Pegasi, zvezde slične Suncu. Ubrzo je usledilo i otkriće prvog ekstrasolarnog planetskog sistema 1999. godine sa opservatorija Lik (Lick) i Vipl (Whipple)[3].

Od 1990. godine do danas otkriveno je 347 planeta, a nove se otkrivaju skoro iz dana u dan. Slanjem misija u svemir, čiji je glavni zadatak pronalaženje ekstrasolarnih planeta, ovaj broj će sve brže rasti tako da se u skorijoj budućnosti očekuje otkriće desetina hiljada planeta od kojih će neke možda biti slične Zemlji.

---

<sup>1</sup> Ili exoplaneta, planeta koja ne kruži oko Sunca već oko neke druge zvezde.

<sup>2</sup> Zvezda sa najvećim sopstvenim kretanjem i jedna od nama bližih zvezda. Naziv je dobila po astronomu koji je otkrio (Barnard, Edward Emerson) .

## 1. Metode detekcije ekstrasolarnih planeta

Vekovima je detekcija ekstrasolarnih planeta bila nemoguća jer jednostavno nije bilo instrumenata kojima bi se zapazio njihov slabi sjaj. Međutim, i posle pronalaska teleskopa i njegovog usavršavanja, i dalje ih nije bilo moguće otkriti. Razlog zašto smo toliko dugo čekali na njihovo otkriće je činjenica da su planete tamni objekti koji se nalaze blizu vrlo sjajnog izvora - zvezde oko koje kruže. U vidljivom delu spektra, njihov sjaj je više od milijardu puta slabiji od sjaja zvezde. Iako su današnji najbolji teleskopi i instrumenti dovoljno osetljivi, problem je u tome što sjaj zvezde potpuno nadjača slabi sjaj planete. Zbog toga je do skoro bilo praktično nemoguće detektovati bilo kakvo zračenje planete pa samim tim i snimiti je. Da bi detektovali planetu astronomi su se morali osloniti na indirektno metode detekcije, odnosno posmatrati njen uticaj na zvezdu oko koje kruže.

Danas postoji više metoda za otkrivanje ekstrasolarnih planeta. Najviše je posrednih metoda a na osnovu svake od njih možemo saznati ponešto o posmatranoj planeti<sup>3</sup>.

Metode otkrivanja ekstrasolarnih planeta su:

- Astrometrija
- Metoda radijalnih brzina
- Mikrofokusiranje (gravitaciona sočiva)
- Metoda pomračenja (fotometrijska metoda)
- Merenje perioda pulsara
- Direktno snimanje

Planeta otkrivena jednom metodom posmatra se kasnije i drugim metodama (ukoliko je to moguće). Na taj način se potvrđuje da je posmatrani uticaj posledica prisustva planete a ne neka druga pojava koja uzrokuje slično ponašanje zvezde, na primer braon patuljak (dvojni zvezdani sistem), uticaj Zemljine atmosfere ili možda greška instrumenta kojim se posmatra.

---

<sup>3</sup> Masu, radijus, gustinu, period revolucije, hemijski sastav, temperaturu, udaljenost od zvezde, inklinaciju orbite...

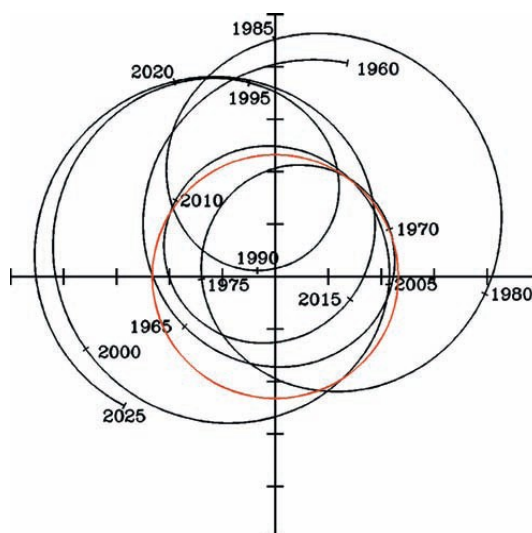
## 1.1. Astrometrija

Astrometrija je jedna od prvih metoda koje su primenjene na traženje planeta van Sunčevog sistema. Ova metoda zasniva se na sledećim činjenicama. Kako su planete masivna tela, ona će svojom gravitacijom uticati na zvezdu oko koje kruže, odnosno zvezda će se kretati oko centra mase (baricentra) sistema. Orbita zvezde, odnosno njena projekcija na nebesku sferu, meri se kao promena položaja zvezde na nebeskoj sferi, najčešće u odnosu na druge, dalje zvezde koje se nalaze u pozadini. Promena položaja zvezde na nebeskoj sferi (uglovni pomeraj) data je sa [2]:

$$S = \frac{m}{M} \frac{r}{d},$$

gde je  $m$  masa pratioca (planete),  $M$  masa zvezde,  $r$  velika poluosa pratioca i  $d$  rastojanje do zvezde. Ukoliko je  $r$  izraženo u astronomskim jedinicama (AJ),  $d$  u parsecima (pc), uglovni pomeraj  $S$  je dat u lučnim sekundama. Taj uglovni pomeraj je veoma mali. Iz jednačine je očigledno da je uglovni pomeraj zvezde veći (samim tim i pogodniji za detekciju) ukoliko je veći odnos masa  $m/M$  (oko manje masivne zvezde kruži masivna planeta), i ukoliko je reč o planeti koja kruži oko nama bliske zvezde i to na velikoj udaljenosti  $r$  od nje.

Kao primer možemo posmatrati naš Sunčev sistem. Iako je kretanje Sunca oko baricentra solarnog sistema komplikovano zbog prisustva većeg broja planeta, na njegovo kretanje najviše utiču spoljašnje, masivnije planete, pre svega Jupiter (12 m/s). Za sistem Sunce – Jupiter sa odnosom masa  $m/M = 0.001$  i rastojanjem Jupitera od Sunca  $r = 5.2$  AJ, uglovni pomeraj Sunca posmatrano sa daljine od 5 pc bio bi svega 0.001 lučna sekunda (1 lučna milisekunda). Na slici 1 je prikazano kretanje Sunca oko baricentra, posmatrano pod pravim uglom u odnosu na ekliptiku sa udaljenosti od 10pc.



*Slika 1. Crna linija predstavlja kretanje Sunca oko baricentra solarnog sistema a crvena veličinu Sunca. Razlika između dve susedne crtice na osama iznosi 0.2 mas (prema [2]).*

Glavni problem kod ove metode je potreba za velikom preciznošću i izbegavanjem grešaka instrumenata<sup>4</sup>. Uglovni pomeraji su za većinu ekstrasolarnih planeta manji od 1 mas<sup>5</sup> što je izvan tehničkih mogućnosti mnogih današnjih instrumenata. Ovaj problem može se prevazići korišćenjem interferometrije. Svetlost koja dolazi sa izvora (zvezde) stiže do dve ili više lokacija (teleskopa). Nakon njihove interferencije meri se mala vremenska

<sup>4</sup> Greške instrumenta mogu izazvati efekte koji se mogu pogrešno protumačiti kao prisustvo planete u orbiti oko zvezde.

<sup>5</sup> milliarcsec – lučna milisekunda.

razlika između signala primljenog u jednom i drugom detektoru, a na osnovu toga i ugao između pravca ka izvoru i baze interferometra. U budućnosti, kako se preciznost ove metode bude povećavala sa lučnih milisekundi na lučne mikrosekunde i korišćenjem teleskopa u svemiru, ova metoda može postati veoma delotvorna.

## 1.2. Metoda radijalnih brzina

Najveći broj ekstrasolarnih planeta otkriven je metodom radijalnih brzina. Ova metoda, kao i astrometrija, koristi činjenicu da gravitacija planete utiče na zvezdu koja se pod tim uticajem kreće po elipsi, sa istim periodom kao i planeta. Kako se u tom slučaju zvezda kreće od, odnosno ka nama, usled Doplerovog efekta linije u spektru zvezde biće pomerene ka crvenom, kada se zvezda kreće od nas, odnosno ka plavom, kada se kreće ka nama. Svetlost zvezde se deli na pojedinačne talasne dužine i na taj način dobija spektar koji se snima CCD kamerom. Na osnovu pomeranja apsorpcionih linija može se odrediti radijalna brzina pomoću formule za Doplerov efekat:

$$v_{rad} = \frac{\Delta \lambda}{\lambda_0} c,$$

gde je  $\Delta \lambda = \lambda - \lambda_0$  razlika registrovane  $\lambda$  i emitovane  $\lambda_0$  talasne dužine,  $c$  brzina svetlosti. Radijalna brzina će se menjati od neke maksimalne do minimalne vrednosti. Na osnovu krive radijalne brzine može se odrediti period zvezde, odnosno planete. Sa poznatim periodom  $P$  možemo, koristeći treći Keplerov zakon i sa poznatom masom zvezde  $M_*$ , odrediti srednju udaljenost planete od zvezde:

$$a^3 = \frac{P^2 GM_*}{4\pi^2}.$$

Brzina zvezde zavisi od gravitacione sile koja na nju deluje. Što je planeta masivnija i bliža zvezdi to je njeno gravitaciono dejstvo na zvezdu veće pa je samim tim i njena orbitalna brzina veća i lakše je primetiti Doplerov pomak linija u spektru. Prema tome, metoda radijalnih brzina je najpogodnija za otkrivanje masivnijih planeta (reda mase Jupitera) koje se nalaze blizu matične zvezde<sup>6</sup>.

Za sistem dva gravitaciono povezana objekta mase  $m_1$  i  $m_2$  po kružnoj orbiti, radijalna brzina tela mase  $m_1$  (masivnije telo) se može izračunati na osnovu formule [2]:

$$v_1 = \frac{m_2 \sin i}{m_1 + m_2} \sqrt{G \frac{m_1 + m_2}{a}},$$

gde je  $i$  – inklinacija orbite.

<sup>6</sup> Pošto se nalaze blizu zvezde površinska temperatura može dostići i 1500 K. Kako su to masivne planete, često se nazivaju vrućim Jupiterima.

Koristeći treći Keplerov zakon dolazimo do:

$$v_1 = \left( \frac{2\pi G}{P} \right)^{\frac{1}{3}} \frac{m_2 \sin i}{(m_1 + m_2)^{2/3}}.$$

Kako je u našem slučaju  $m_2$  masa planete koja je mnogo manja od mase zvezde sledi da je  $m_1 + m_2 \approx m_1$ , što pojednostavljuje jednačinu:

$$v_1 = \left( \frac{2\pi G}{P} \right)^{\frac{1}{3}} \frac{m_2 \sin i}{m_1^{2/3}}.$$

Došli smo do izraza koji povezuje radijalnu brzinu zvezde sa  $m_2 \sin i$ . Ukoliko period  $P$  izrazimo u godinama, a radijalnu brzinu u km/s, masa  $m_2 \sin i$  je data u masama Jupitera:

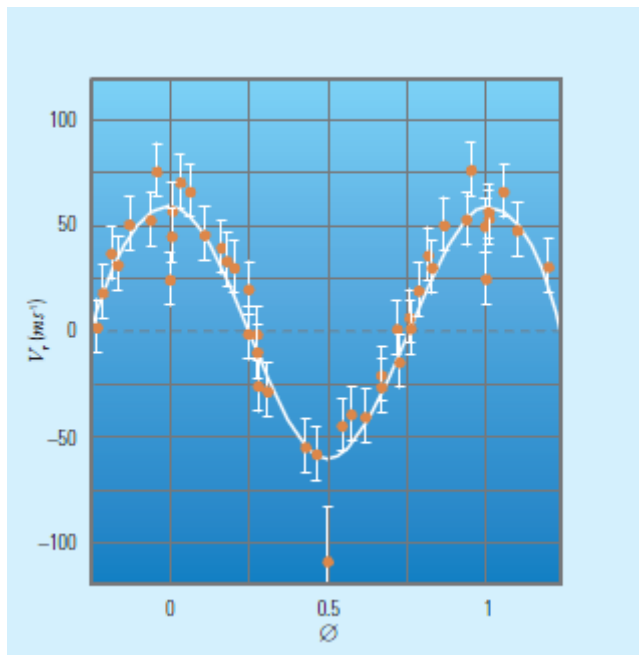
$$m_2 \sin i = v_1 \frac{(P m_1^2)^{1/3}}{28.4}.$$

Ukoliko nam je poznata masa zvezde  $m_1$  možemo izračunati  $m_2 \sin i$ . Vidimo da je dobijena masa neodređena do na faktor  $\sin i$ . Naime, Doplerovim pomakom se određuje samo radijalna komponenta brzine, tako da inklinacija orbitalne ravni zvezde nije poznata. Zbog toga masa planete otkrivene ovom metodom predstavlja donju (minimalnu) granicu mase. Međutim, za proizvoljno orijentisanu orbitu, prava masa planete je najverovatnije do nekih 30% veća od minimalne. Dakle, da bi znali pravu masu planete potrebno je da znamo inklinaciju  $i$ . Ovaj problem iščezava ukoliko planeta koja se posmatra pomračuje zvezdu. U tom slučaju inklinacija je poznata, pa je moguće odrediti tačnu masu planete. Inklinaciju orbite je moguće odrediti i posmatranjem planete astrometrijskom metodom.

Pod uticajem gravitacije Jupitera, Sunce se kreće brzinom od 12 km/s a pod uticajem Saturna samo 2.8 km/s. Dakle, da bi se ovom metodom otkrivale planete sličnih masa kao Jupiter i Saturn, potrebna je preciznost od nekoliko km/s pri određivanju radijalnih brzina. Da bi se postigla ovolika preciznost koriste se dve tehnike: tehnika apsorbujućih ćelija gasa i simultana torijum-argon tehnika u kombinaciji sa stabilisanim spektrometrima. Kod prve metode, svetlost zvezde se propušta kroz male staklene ćelije ispunjene odgovarajućim gasom (najčešće je to para joda), čiji se apsorpcioni spektar dodaje spektru zvezde. Upoređivanjem ova dva spektra može se primetiti kretanje spektra zvezde. U drugoj metodi emisioni spektar torijum-argon lampe se postavlja paralelno spektru zvezde što ponovo omogućava njihovo poređenje. Ova metoda je moguća samo u kombinaciji sa stabilisanim spektrografima. Da bi se izbegle bilo kakve greške instrumenta, spektrografi nemaju pokretne delove i postavljaju se u sredinu sa konstantnom temperaturom i pritiskom. Obe tehnike postižu preciznost od nekoliko km/s [3].

Da bi se ovom metodom pouzdano utvrdilo prisustvo planete, potrebno je vršiti posmatranje u trajanju punog orbitalnog perioda. Loša strana ove metode je njena neprimenljivost na zvezde masivnije i toplije od Sunca jer imaju manje spektralnih karakteristika. Problem se javlja i kod zvezda manje mase od Sunca koje su slabijeg sjaja pa je zbog manjka fotona nemoguće dobiti podatke zadovoljavajućeg kvaliteta.

2). Prva planeta oko zvezde slične Suncu, 51 Pegasi, otkrivena je ovom metodom (Slika



*Slika 2. Kriva radialne brzine zvezde 51 Pegasi. Kretanje zvezde prouzrokovano je planetom sa  $m \sin i = 0.5$  Jupiterovih masa, koja se nalazi na kružnoj orbiti  $a = 0.05$  AJ, sa orbitalnim periodom 4.2 dana (prema [4]).*

### 1.3. Mikrofokusiranje (gravitaciona sočiva)

Po Ajnštajnovoj opštoj teoriji relativnosti, gravitacija savija prostor. Prema tome, svetlost koja prolazi pored masivnog tela mora promeniti pravac kretanja usled savijenosti prostora. U određenim slučajevima ovo može dovesti do toga da masivno telo koje se nađe između posmatrača i izvora svetlosti (zvezde) postane "gravitaciono sočivo", odnosno da fokusira svetlost zvezde. Posmatrač bi tada mogao da vidi nekoliko likova zvezde koji se nalaze na međusobnom rastojanju od nekoliko lučnih milisekundi formirajući prsten<sup>7</sup> oko sočiva (Slika 3). Ukoliko se ovo masivno telo ne nalazi tačno između posmatrača i zvezde neće se formirati prsten već nastaju dva lika zvezde koji se nalaze dijametralno suprotno u odnosu na sočivo.

*Slika 3. Krug iscrtan isprekidanom linijom predstavlja Ajnštajnov prsten unutar kog se mora nalaziti pozadinska zvezda da bi došlo do mikrofokusiranja. Linijom su povezane dve slike koje nastaju istovremeno (prema [1]).*



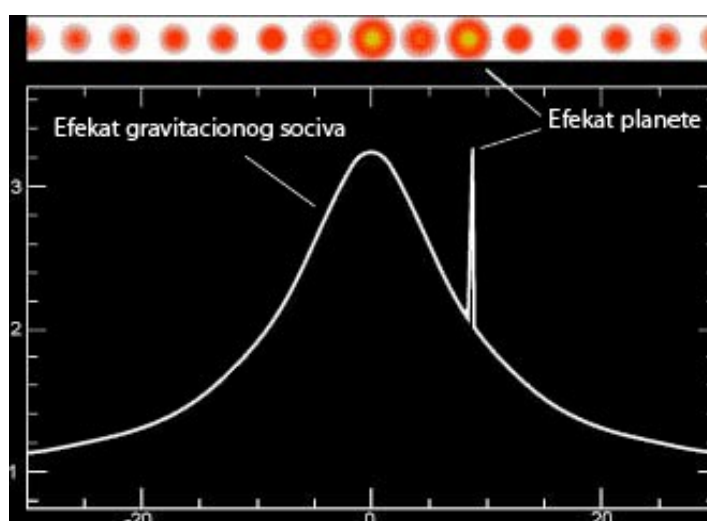
<sup>7</sup> Ajnštajnov prsten



Kako ova pojava dovodi do uvećanja lika zvezde, doći će i do uvećanja njenog sjaja. To uvećanje zavisi od geometrijske situacije i maksimalno je kada je sočivo tačno između posmatrača i zvezde.

Gravitaciono sočivo može biti svaki objekat sa masom. Međutim, što je telo masivnije njegovo gravitaciono polje će više zakriviti prostor odnosno biće bolje gravitaciono sočivo. Prema tome zvezde, galaksije pa čak i planete mogu biti gravitaciona sočiva. Na toj činjenici se i zasniva ova metoda.

Efekat gravitacionog fokusiranja može se predstaviti krivom sjaja. Ukoliko objekat koji služi kao gravitaciono sočivo uz sebe ima planetu, ta planeta će se takođe ponašati kao sočivo samo manje. U tom slučaju kriva sjaja neće izgledati pravilno već će se na njoj pojaviti manja kriva istog tipa koja potiče od gravitacionog uticaja planete (Slika 4).



*Slika 4. Kriva sjaja (prema [1]).*

Ova metoda zahteva posmatranje velikog broja objekata - potencijalnih gravitacionih sočiva jer je verovatnoća da posmatranjem samo jednog objekta primetimo efekte fokusiranja veoma mala. Pojave mikrofokusiranja su češće u smeru ka centru Galaksije tako da su današnja posmatranja uglavnom usmerena ka tom delu neba.

Ove pojave su jedinstvene (ne ponavljaju se), što predstavlja još jednu nepogodnost ove metode, a planete za koje je metoda najpogodnija nalaze se na velikom rastojanju od nas (nekoliko kpc)<sup>8</sup>. Međutim, ova metoda nam omogućava otkrivanje planeta malih masa koje se nalaze unutar Ajnštajnovog prstena, što kod zvezda kao što je Sunce iznosi otprilike 5AJ. Takođe, da bi se detektovala planeta nije potrebno da ona obiđe celu orbitu kao što je to slučaj kod metode radijalnih brzina. Da li oko zvezde kruži planeta ili ne možemo zaključiti na osnovu krive sjaja.

<sup>8</sup> Uvećanje sjaja je veće ukoliko je veća masa planete i udaljenost od posmatrača.

## 1.4. Metoda pomračenja (fotometrijska metoda)

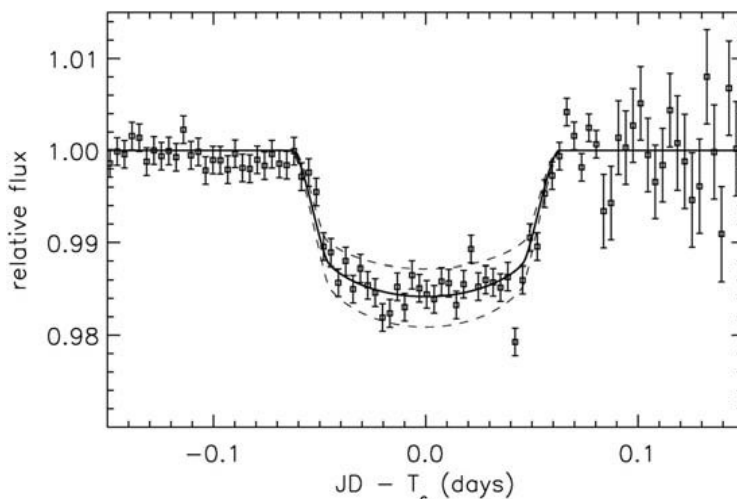
U specijalnom slučaju kada je inklinacija orbite ekstrasolarne planete približno jednaka  $90^\circ$  doći će do pomračivanja zvezde planetom. Kako ne možemo razlučiti disk zvezde, tranzit planete možemo posmatrati samo kao smanjenje sjaja zvezde, za šta je potrebno izuzetno precizno fotometrijsko merenje. Verovatnoća  $T$  da tranzit planete bude viđen sa Zemlje zavisi od radijusa zvezde  $R_*$ , radijusa planete  $R_p$  i njene udaljenosti od zvezde  $a$  [2]:

$$T = \frac{R_* + R_p}{a}$$

Za džinovske planete na rastojanju od približno 0.04 AJ, verovatnoća za tranzit je oko 10%. Sjaj zvezde se u tom slučaju smanji oko 1%.

Tranzit se može detektovati sa Zemlje korišćenjem najsavremenijih fotometrijskih instrumenata čija je preciznost 0.1%. Otkrivanje manjih planeta ovom metodom zahteva veću preciznost koja se ne može postići na Zemlji zbog nepovoljnog uticaja atmosfere. Zbog toga su posmatranja iz svemira od ključnog značaja.

*Slika 5. Kriva sjaja zvezde HD 209458. Primećuje se smanjenje fluksa za 1.5% usled tranzita vrućeg Jupitera. Na osnovu dubine minimuma dobijen je radijus planete oko 1.4 Jupiterovih radijusa. Sa poznatom masom planete, dobijenom metodom radijalnih brzina, izračunata je gustina od svega  $0.31 \text{ g/cm}^3$  (prema [2]).*



Kako je za planete posmatrane ovom metodom inklinacija orbitalne ravni poznata ( $\sim 90^\circ$ ), merenjem radijalne brzine zvezde može se dobiti tačna vrednost mase planete. Dubina u krivoj sjaja omogućava procenu radijusa planete a kako nam je poznata masa možemo izračunati njenu srednju gustinu. Na slici 5 je prikazana kriva sjaja zvezde HD 209458.

Zračenje planete u optičkom delu spektra je milijardu puta slabije od zračenja zvezde. Međutim, u infracrvenom delu spektra taj odnos je malo manji što otvara mogućnost posmatranja zvezde u tom području i lakšu detekciju planete direktnom metodom. Naime, ukoliko je infracrveno zračenje zvezde oslabljeno u trenutku kada se planeta nalazi iza nje, u odnosu na posmatrača, onda je razlika u zračenju za vreme pomračenja i van njega - zračenje planete.

Poređenjem spektroskopskih posmatranja visoke rezolucije za vreme tranzita i van tranzita može se otkriti postojanje atmosfere planete. Proučavanje atmosfere je od izuzetnog naučnog značaja jer možemo dobiti sliku o uslovima kakvi vladaju na planeti – od kojih gasova se sastoji, kolika je temperatura na površini, da li na njoj ima tečne vode pa čak i da li postoji neki vid života.

Da li će doći do pomračenja neke zvezde ne možemo predvideti. Zbog toga je potrebno konstantno pretraživati nebo. Kada se tranzit dogodi, treba biti spreman jer traje vrlo kratko u odnosu na period revolucije planete. Da bi bili sigurni da je reč o planeti, potrebno je posmatrati tranzit nekoliko puta. Vreme između dva tranzita zavisi od rastojanja od zvezde,  $a$ . Dakle, za male vrednosti  $a$  pored veće verovatnoće da će do pomračenja doći, smanjuje se i vreme između dva uzastopna tranzita pa se relativno brzo može potvrditi prisustvo planete.

## 1.5. Merenje perioda pulsara

Pulsari su neutronske zvezde koje nastaju u eksploziji supernove ili tesno dvojnog sistema i predstavljaju kolapsirano jezgro zvezde mase od 15 do 30 masa Sunca. Pulsari su veoma malih dimenzija, prečnika od 10 do 20 km, mase od 1.4 do 3 mase Sunca, pa je njihova gustina veoma velika ( $10^9 - 10^{14} \text{ g/cm}^3$ ). Iz uslova održanja momenta impulsa i magnetnog fluksa sledi da ove zvezde rotiraju veoma brzo (sa periodom između 0.033s i 4s) i da je njihovo magnetno polje veoma jako. Magnetno polje može ubrzati elektrone do relativističkih brzina tako da oni emituju mlazove radio talasa, X i gama zrake. Ovi mlazovi se emituju unutar uskog konusa na polovima magnetnog polja. Kako magnetno polje rotira zajedno sa pulsarom ali mu se osa ne poklapa sa osom rotacije pulsara, posmatrač na Zemlji će ovo zračenje detektovati samo kada su mlazovi radio talasa usmereni ka Zemlji. Period ponavljanja ovih impulsa se poklapa sa periodom rotacije pulsara, a preciznost ponavljanja se poredi sa preciznošću najboljih atomskih časovnika [5].

Kao i kod metode radijalnih brzina i astrometrije, koristi se činjenica da planeta koja kruži oko pulsara deluje svojom gravitacijom na taj pulsar uslovljavajući pri tom njegovo kretanje oko zajedničkog centra mase. U slučaju kada je inklinacija različita od  $0^\circ$ , pulsar će se kretati ka, odnosno od posmatrača. Za razliku od metode radijalnih brzina, gde smo kretanje zvezde detektovali Doplerovim pomakom, ovde se to postiže merenjem promene perioda pulsara. Ta promena se javlja jer je signalu potrebno različito vreme da dođe do posmatrača s obzirom da je rastojanje koje signal prelazi različito kada nam je pulsar najdalji i kada nam je najbliži. Ova promena je vrlo mala ali ipak merljiva vrlo preciznim instrumentima. Znači, periodične promene perioda pulsara jasan su znak da oko njega kruži planeta.

Preciznost pulsara omogućava nam da zapazimo veoma male promene perioda pa je moguća detekcija planeta relativno malih masa<sup>9</sup>. Međutim, kako je pulsar „mrtva“ zvezda sa visoko energetskim zračenjem, ove planete su najverovatnije mrtvi svetovi nimalo nalik Zemlji.

---

<sup>9</sup> Reda mase Zemlje pa čak i Meseca.

Prva ekstrasolarna planeta otkrivena je ovom metodom 1990. godine oko pulsara PSR B1257+12. Interesantno je da masa ove planete približno odgovara masi Meseca! Kasnije su oko istog pulsara otkrivene još dve planete po masi sličnije Zemlji<sup>10</sup> [2].

Do danas je ovom metodom otkriveno svega 7 planeta u 4 planetarna sistema pa se smatra da planete oko pulsara nisu česte.

## 1.6. Direktno snimanje

Svim dosad opisanim metodama moguće je otkriti planete oko zvezda, proceniti njihove mase i veličinu, orbitalni period, udaljenost od zvezde, inklinaciju orbite, gustinu, temperaturu... Međutim, pravi izazov je direktno snimiti planetu. Slika ekstrasolarne planete bi naučnicima pružila dodatne informacije o njenom hemijskom sastavu i temperaturi, periodu rotacije, godišnjim dobima i količini vode na površini.

Planete su veoma slabi izvori svetlosti. Njihov sjaj u vidljivom delu spektra je milijardu puta slabiji od sjaja zvezde. Međutim i pored tako slabog sjaja, vrhunski teleskopi poput Hubble-a bi ih mogli snimiti. Problem je u tome što se i nama najbliže zvezde nalaze na toliko velikom rastojanju od nas da se planete koje oko njih kruže iz naše perspektive nalaze suviše blizu zvezdi. Svetlost zvezde u potpunosti nadvlada svetlost planete čineći njenu neposrednu detekciju nemogućom. Direktno snimanje planete moguće je samo ukoliko se na neki način ukloni zaslepljujući sjaj zvezde. Postoji nekoliko metoda kojima je to moguće učiniti. Najčešće se koristi instrument koji se naziva koronograf, izum francuskog astronoma Bernarda Lyota. On je ovaj instrument konstruisao još 1930. godine da bi proučavao Sunčevu koronu van totalnog pomračenja. Koronograf predstavlja neprozirnu pločicu koja se postavlja na putanju svetlosti koja dolazi do teleskopa. U zavisnosti od veličine objekta koji se posmatra, pločice koje se koriste mogu biti različitih dimenzija.

Za posmatranja sa Zemlje, da bi se postigao što bolji kvalitet slike potrebno je uticaj atmosfere svesti na minimum. To se postiže primenom takozvanih sistema prilagodljive (adaptivne) optike. Ovi sistemi koriste senzore talasnog fronta da izmere greške talasnog fronta nastale kao posledica turbulencije atmosfere, a zatim prilagođavaju putanju svetlosti kroz teleskop pomoću ogledala i na taj način te greške kompenzuju.

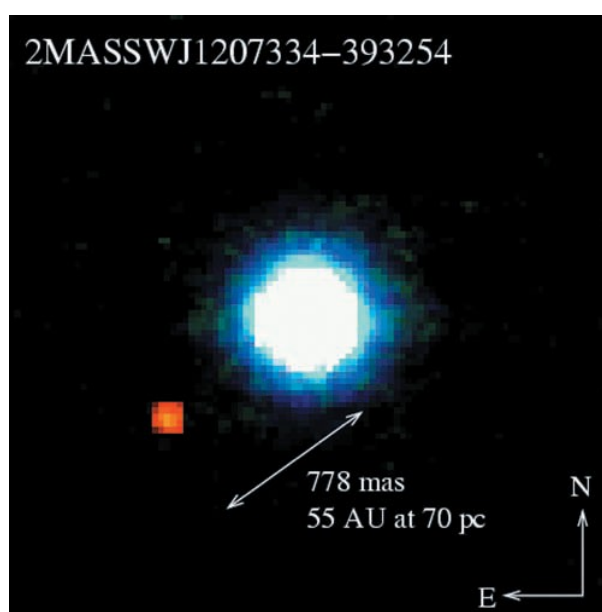
Kombinovanjem koronografa i adaptivne optike moguće je dobiti slike visokog kvaliteta. Problem kod upotrebe koronografa je potreba za veoma malim pločicama kojima bi se uklonila samo svetlost zvezde a ne i planete koja se posmatra. Rastojanje planeta od zvezda je uporedivo sa veličinom pločica najsavremenijih instrumenata što dodatno otežava njihovo posmatranje.

Koronograf ne može u potpunosti da ukloni sjaj zvezde jer će se na ivici pločice i dalje primećivati rasejanje svetlosti. Ta rasejana svetlost se naziva haloom zvezde. Ako se prilikom snimanja koriste male ekspozicije, halo se javlja u vidu malih tamnih i svetlih tačkica koje se nazivaju pege i koje predstavljaju interferenciju svetlosti. Na mestu tamne pege, svetlost zvezde je destruktivnom interferencijom poništena pa se na njenom mestu može lako detektovati slabi sjaj planete ako se ona tu nalazi. Svako snimanje rezultuje

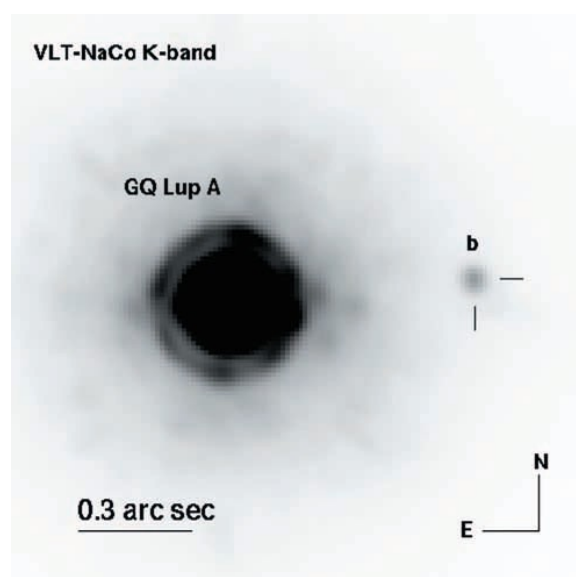
<sup>10</sup> Njihove mase su 3.4 i 2.8 masa Zemlje.

slikom sa različitim rasporedom tamnih i svetlih pega a na mestu gde se nalazi planeta nikada se ne javlja tamna pega<sup>11</sup>. Snimanjem velikog broja slika i njihovom analizom može se detektovati i snimiti planeta (Slika 6 i 7).

Druga metoda za uklanjanje zaslepljujućeg sjaja zvezde i dobijanje slika ekstrasolarnih planeta je takozvana metoda poništavajuće interferometrije (nulling interferometry). Teorijski je moguće kombinovati svetlosne talase koji stižu do dva ili više teleskopa na taj način da se talasni maksimum koji stiže do jednog teleskopa poništi sa talasnim minimumom koji stiže do drugog. Na taj način svetlost zvezde je uklonjena [2]. Poništavajuću interferometriju koristeće Veliki Dvooki Teleskop (Large Binocular Telescope) koji se sastoji od dva teleskopa prečnika objektiva 8 metara, NASA-in Terrestrial Planet Finder (TPF) i ESA-in Darwin.



*Slika 6. Pratioc braon patuljka 2MASSWJ1207334-393254 sa masom oko 5 masa Jupitera (prema [2]).*



*Slika 7. Još jedan kandidat za prvu sliku ekstrasolarne planete – pratioc mlade zvezde GQ Lupi A sa masom oko 22 mase Jupitera (prema [2]).*

<sup>11</sup> Javlja se svetla pega koja predstavlja zračenje planete.

## ZAKLJUČAK

Većina dosad otkrivenih planetskih sistema se po strukturi znatno razlikuje od našeg Sunčevog sistema. Otkrivene planete su uglavnom džinovi veći od Jupitera koji se nalaze blizu zvezde (bliže nego Merkur našem Suncu), a orbite su im velikog ekscentriciteta. Videli smo da je većina opisanih metoda pogodna za otkrivanje upravo takvih planeta tako da ne treba odmah zaključiti da su takve planete i najbrojnije.

Slanjem misija u svemir, kako bi se izbegao nepovoljan uticaj atmosfere na posmatranja, i usavršavanjem instrumenata, verovatnoća za pronalaženje planeta sličnih Zemlji znatno će se uvećati. U planu je veliki broj misija a neke su već i otpočele. Tako je 6. marta 2009. godine uspešno lansirana misija Kepler čiji je zadatak otkrivanje planeta sličnih Zemlji. Terrestrial Planet Finder (TPF) i Darwin su buduće misije koje će takođe tragati za „drugim Zemljama“. Njihov cilj je snimanje planeta koje se nalaze u nastanjivoj zoni ali i procenjivanje njihovih fizičkih i hemijskih karakteristika. Tu su naravno i misije sa ciljem da otkriju što veći broj „vrućih Jupitera“, kao što su FAME<sup>12</sup>, SIM<sup>13</sup> i GAIA<sup>14</sup>.

Otkrivanje planetskih sistema može nam pojasniti formiranje planeta u našem Sunčevom sistemu. Zasad se svi otkriveni sistemi znatno razlikuju od našeg. Da li će buduća posmatranja pokazati da je naš sistem jedinstven po strukturi ili možda slični postoje širom Galaksije?

Iako još uvek nismo odgovorili na sva vekovima stara pitanja, treba imati u vidu da smo tek pre nepune dve decenije počeli odgonetati misterije ekstrasolarnih planeta tako da smo praktično tek na početku. Na odgovor da li uopšte postoje planete oko drugih zvezda čekali smo više hiljada godina. Sada kad smo zahvaljujući razvoju tehnologije saznali da postoje, samo je pitanje vremena kada ćemo i na ostala pitanja saznati odgovor. Naravno, treba biti strpljiv. Strpljenje će se na kraju ipak isplatiti.

---

<sup>12</sup> Full-Sky Astrometric Mapping Explorer.

<sup>13</sup> The Space Interferometric Mission.

<sup>14</sup> Global Astrometric Interferometer for Astrophysics.

## LITERATURA

- [1] **M111**, Časopis astronomske udruge „Vidulini”, Kanfanar
- [2] *McFadden, L.-A., Weissman, P. R., Johnson, T. V.:*  
**Encyclopedia of the Solar System**, 2007, 2<sup>nd</sup> edition, Elsevier Inc.
- [3] *Murdin, P.:*  
**Encyclopedia of Astronomy and Astrophysics**, 2001, Nature Publishing Group
- [4] *Percy, J. R.:*  
**Understanding Variable Stars**, 2007, Published in the United States of America by Cambridge University Press, New York
- [5] *Vukićević–Karabin, M., Atanacković–Vukmanović, O.:*  
**Opšta astrofizika**, 2004, Zavod za udžbenike i nastavna sredstva – Beograd