

Математичка гимназија у Београду

МАТУРСКИ РАД
ИЗ ПРЕДМЕТА АСТРОНОМИЈА
МЕТОДИ ДЕТЕКЦИЈЕ ЕГЗОПЛАНЕТА И
ПОСМАТРАЊЕ ТРАНЗИТА СА ПРОЦЕНОМ
ПАРАМЕТАРА ПЛАНЕТЕ ИЗ ТОГ
ПОСМАТРАЊА

Ментор: Слободан Спремо

Ученик: Ђорђе Милић

Београд, јун 2021.

Садржај

1. Увод	3
2. Методе детекција егзопланета	4
2.1. Варијације ротације пулсара (Pulsar timing)	4
2.2. Варијације пулсација променљивих звезда (Variable star timing)	5
2.3. Директно сликање	5
2.4. Гравитациона сочива	8
2.5. Радијална брзина	10
2.6. Транзитна фотометрија	12
2.7. Кинематика диска	15
2.8. Астрометрија	15
2.9. Варијација трајања транзита	15
2.10. Статистика откривених планета	15
2.11. Мисије Кеплер и ТЕСС	18
3. Обрада посматрања спектра звезде и транзита.....	20
3.1. Увод о посматрању и опреми	20
3.2. HD 189733 и њена планета HD 189733b	21
3.3. Посматрање спектра звезде и одређивање температуре звезде	23
3.4. Хертцшпунг-Раселов дијаграм, релација маса-сјај и одређивање луминозности, маса и полупречника звезде	25
3.5. Удаљеност система	28
3.6. Параметри планете	29
4. Закључак	31
5. Литература	34

1. Увод

Егзопланете су планете које се не налазе у Сунчевом систему, већ орбитирају око других звезда. Оне могу бити залеђени гасовити цинови који су далеко од својих матичних звезда, могу бити ужарене лопте гаса веома близу својој звезди, или могу бити планете сличне Земљи на којима се претпоставља да постоје услови за живот. Иако је постојање планета ван Сунчевог система потврђено тек крајем 20. века, њихово постојање је разматрано дуго времена. Неки од првих људи који су претпостављали да егзопланете постоје су били Тихо Брахе и Њутн. Егзопланете су такође биле описиване у многим делима научне фантастике двадесетог века, све без иједног доказа о њиховом постојању. Након њиховог открића крајем 20-ог века откриване су разне методе њиховог налажења. Од тад је налажено све више и више њих, тако да данас знамо за више од четири хиљаде. У последњих двадесет година развили смо десетак метода детекција егзопланета, од којих су неке корисније од других.

У овом раду ћу се бавити методама детекција егзопланета, колико је која од тих метода ефикасна у налажењу планета, о мисијама које су тражиле егзопланете, као и о налажењу параметара планете, звезде и система звезда-планета као целину из посматрања.

2. Методе детекција егзопланета

У овом делу рада ћу се бавити неким од утицајним, значајним и битним методама детекције егзопланета.

2.1. Варијације ротације пулсара (Pulsar timing)

Неутронске звезде су једно од могућих тела која могу настати током супернове. Када дође до супернове, због недостатка фузије, језгро звезде имплодира под сопственом гравитацијом, где се сваки протон и електрон у језгру претвори у неутрон и неутрино, док се остатак звезде разлети. Неутронске звезде су сачињене од дегенерисаног неутронског гаса, имају масу од 1.4 до 2.9 маси Сунца, а полупречник око 10 километара. Брзине ротације оваквих тела зависе од брзина ротација звезда од којих су настали, и обично узимају вредности између неколико милисекунди и неколико секунди. Такође, неутронске звезде често имају веома јака магнетна поља (неке имају магнетна поља реда величине $10^{11}T$, мада већина имају слабија). Постоји више подтипова неутронских звезде, од којих су пулсари најбитнији.

Пулсари су неутронске звезде које имају типичне периоде ротације и јака магнетна поља. Њихова јединствена карактеристика су два млаза електромагнетних таласа који су емитовани са њихових магнетних полова. Пошто магнетни полови често нису поравнати са ротационим, ови млазеви праве широк траг по небу. Посматрач који се нађе на путу ових млазева ће видети пулсирајућу звезду. Ови пулсеви су прецизнији од атомских сатова (имају прецизност од $10^{-17}s$).

Невероватна прецизност ових пулсева има своје примере, као што је навигација, или чак, налажење планета. Прва егзопланета икад пронађена је детектована овом методом.

Налажење планета овом методом има своје предности. Велика прецизност периода ротације пулсара и велика прецизност детектора омогућавају откривање планета мале масе (најлакша планета откривена овом методом има 2% масе Земље). Такође, могуће је открити и одредити орбиталне параметре система са више планета. Могуће је наћи

планете са јако малим орбиталним периодима и са јако дугим орбиталним периодима (најкраћи период износи око 0.08 дана а најдужи 36525 дана).

Ипак, ова метода има лошу страну. Звезде довољно масивне да направе неутронску звезду су веома ретке (свега око 0.0001% свих звезда). Самим тим су ретки и пулсари. Планете које постоје око толико масивних звезди имају јако малу шансу да имају услове за живот, а још мању да се на њима развије интелигентан живот. Такође, шанса да се планета формира након супернове (или не буде уништена у супернови) је мала. Даље, због великих нивоа радијације која долази са пулсара овакве планете нису од великог значаја.

2.2. Варијације пулсација променљивих звезда (Variable star timing)

Ова метода је релативно слична претходној. Главне разлике су што у претходној посматрамо радио емисије са пулсара а у овој посматрамо светлост која је ближа видљивом спектру која потиче од променљивих звезда.

Променљиве звезде најчешће пулсирају са регуларним периодима. Слично као код пулсара, ако постоји планета близу звезде ове пулсације могу бити ирегуларне и те ирегуларности се могу детектовати. Пошто су променљиве звезде често нестабилне и често су у питању цинови, планете детектоване овом методом често нису од значаја.

2.3. Директно сликање

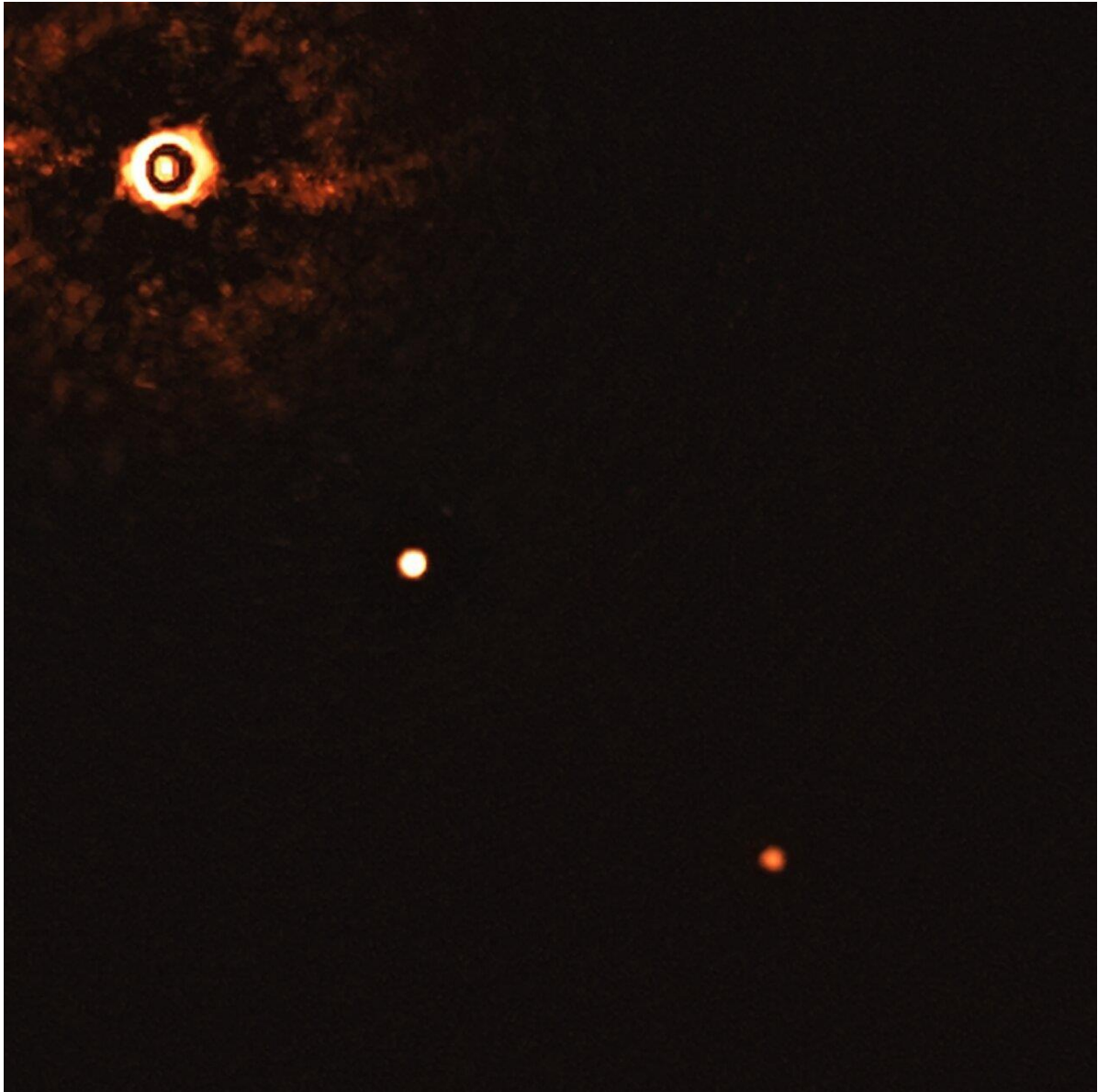
Као што име сугерише, ова метода се заснива на сликању планете. Најлакше је снимати планете које орбитирају или око малих звезда, или планете које су на великој раздаљини од својих матичних звезда.

Оваква посматрања се не могу извршити било каквим телескопом. Потребни су велики телескопи, опремљени коронографима који блокирају светлост матичне звезде која би иначе онемогућила посматрање било каквих планета. Посматрања се најчешће врше у инфрацрвеном делу спектра, зато што су планете које су далеко од својих матичних звезда хладне и зраче више у инфрацрвеном делу спектра. Лакше је снимати планете чије

су орбите нормалне не раван визуре (визура је права која спаја посматрача и посматран објекат), јер бисмо иначе могли да посматрамо планету само када је њено угаоно растојање од звезде највеће.

Директним посматрањем планете можемо одредити њену удаљеност од матичне звезде и њен орбитални период (под условом да се посматрања врше довољно дуго и да знамо удаљеност звезде). Али, није могуће прецизно наћи полупречник и масу планете, већ се они могу само проценити (полупречник се не може наћи мерењем величине планете на слици зато што не постоји камера ни телескоп који могу да развију такву резолуцију у таквим условима).

Највише планета откривено овом методом су велике, и имају масе пар пута веће од Јупитера. Такође орбитирају даље од матичних звезде, тако да се често називају “Хладни џинови” (исти назив се користи да Уран и Нептун).

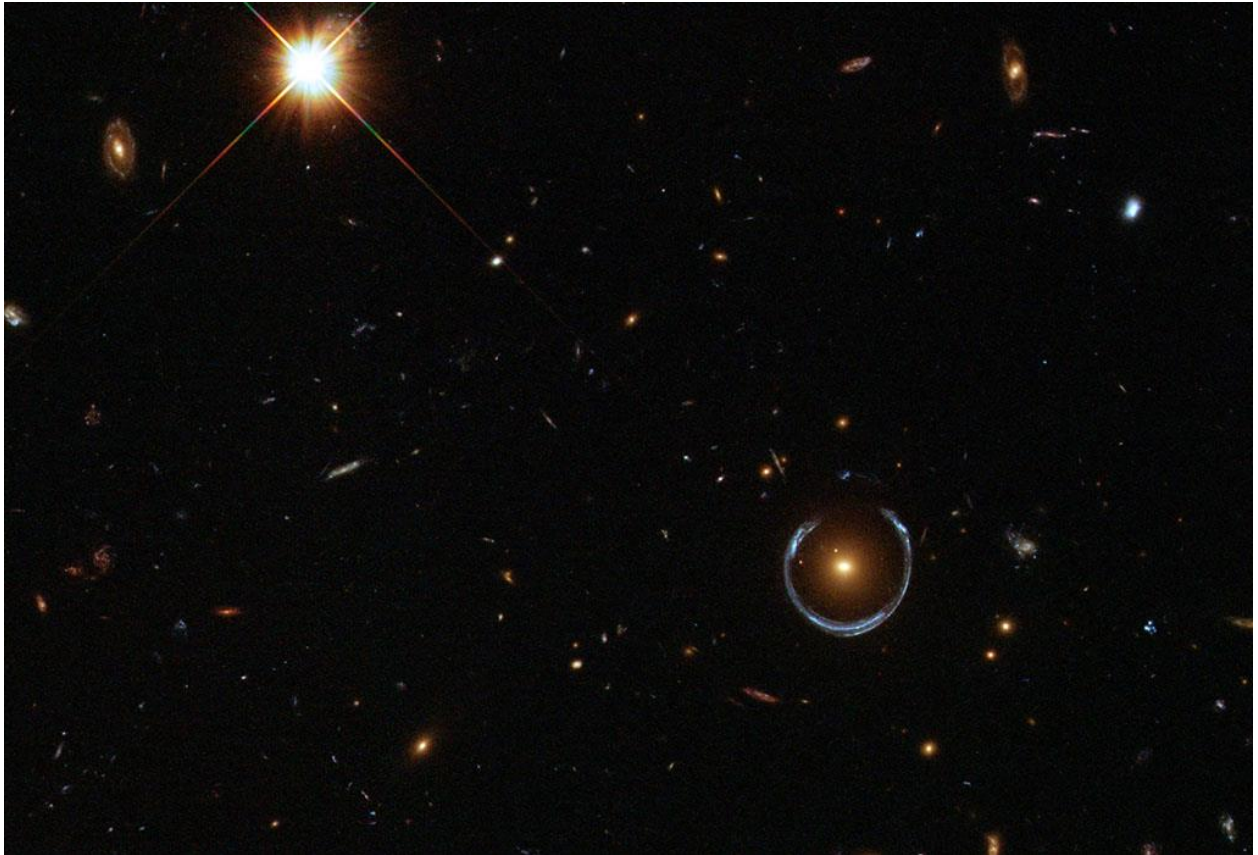


Слика 1: Планете TYC 8998-760-1b и TYC 8998-760-1c усликане.

Егзопланете се најчешће називају тако што се на име звезде дода мало слово абецедне, од почетка, без “а”. Значи, ове две усликане планете су, по реду, прва и друга. Ово су прве планете усликане које се налазе око звезде сличне Сунцу, а један од разлога зашто је овај систем успешно усликан је што је стар само 17 милиона година, што значи да су ове планете веома топле, па јако зраче у инфрацрвеном делу спектра.

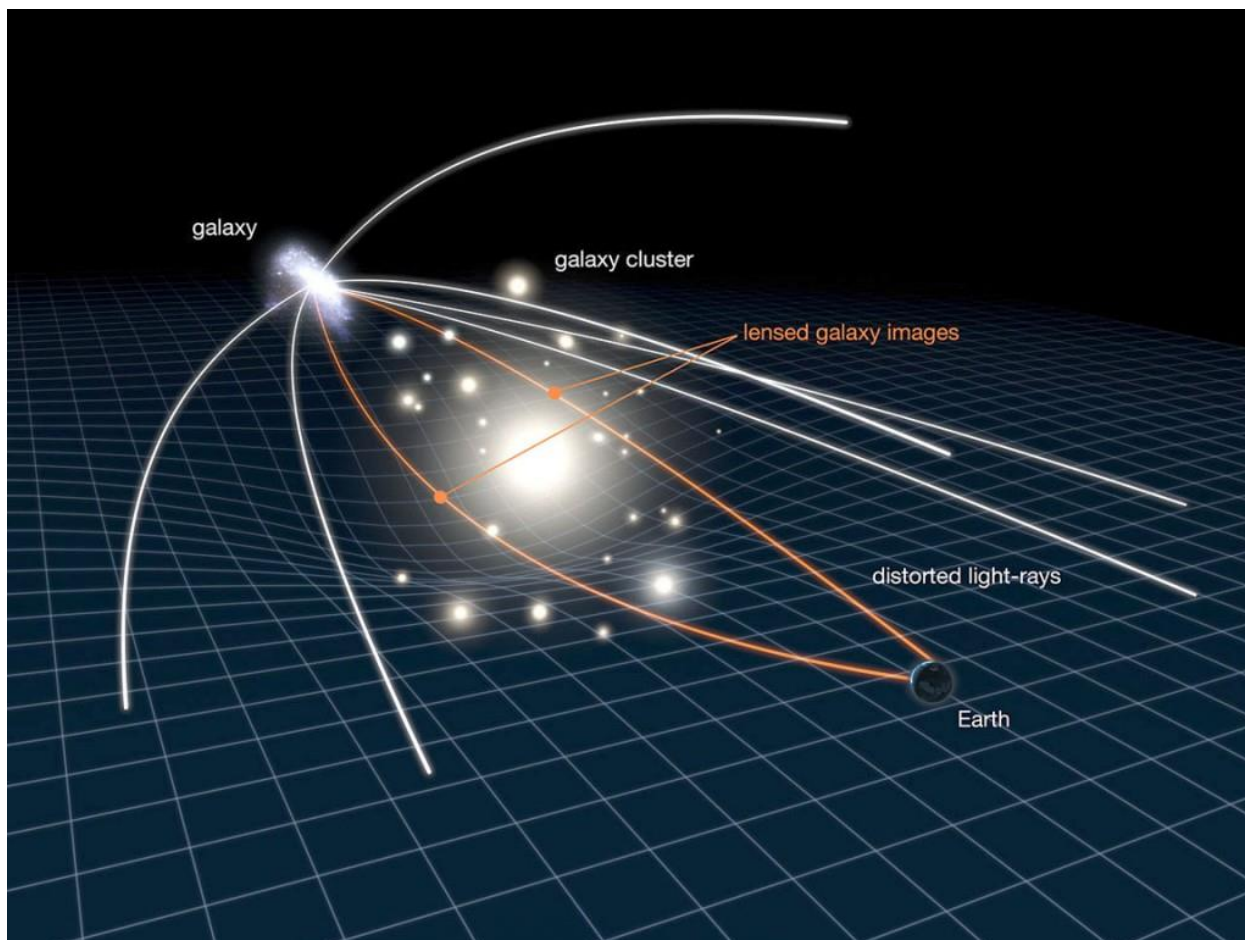
2.4. Гравитациона сочива

Гравитационо сочиво је феномен који се дешава када гравитационо поље масивног објекта довољно закриви светлост другог објекта да добије ефекат огромног сочива.



Слика 2: гравитационо сочиво

На слици 2 је приказано гравитационо сочиво. Овај феномен се најчешће уочава када се масивна галаксија или јато галаксија нађе између мете коју посматрамо и Земље. Маса галаксије закривљује светлост и фокусира је тако да посматрач види прстен (или, као на слици, само део прстена).



Слика 3: Визуелизација ефекта гравитационог сочива.

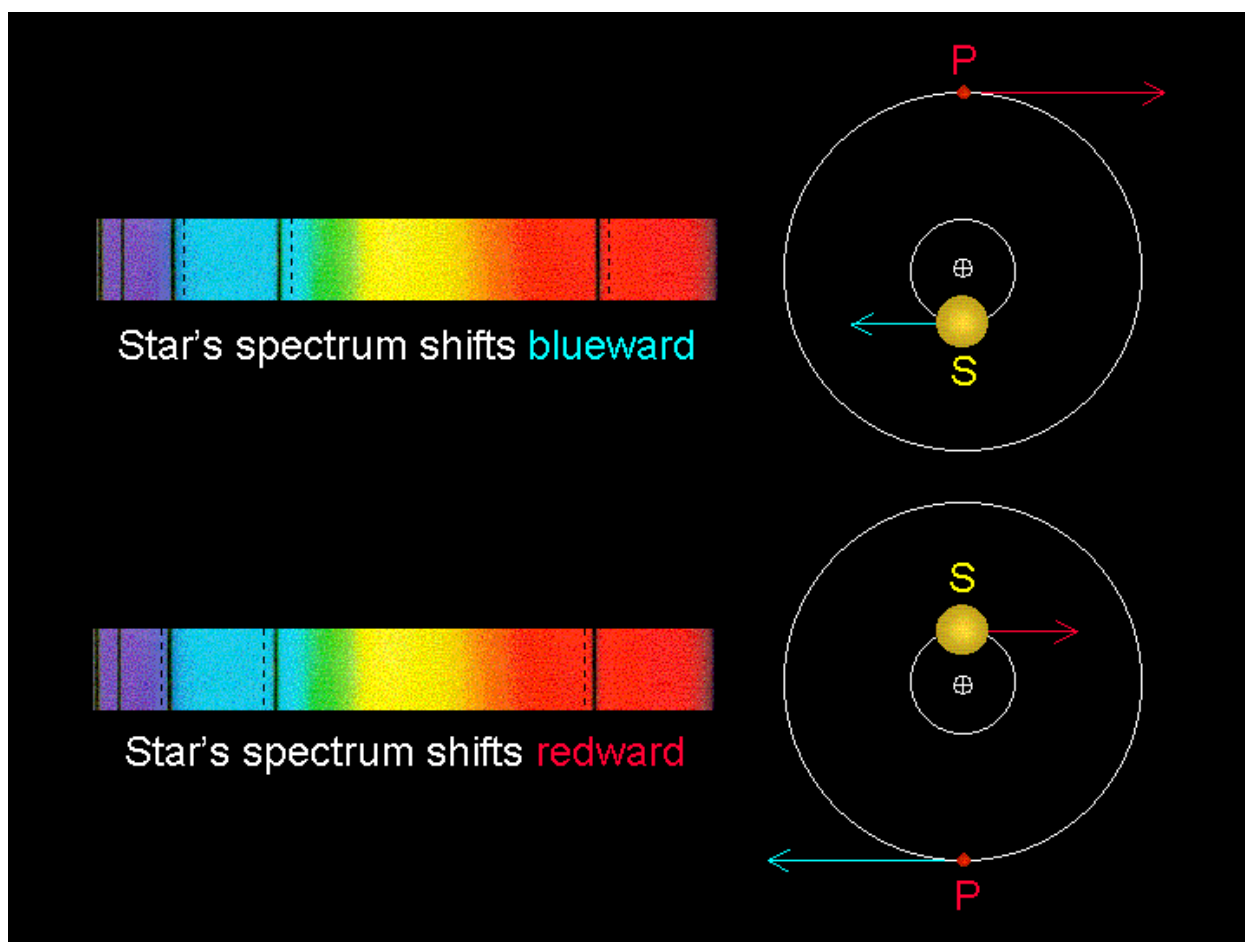
Иако је овај феномен најочљивији на галаксијама и галактичним јатима може се десити и са звездама. Да би се овај ефекат јавио код звезда потребно је да су звезде скоро савршено поравнате. Такође, пошто овај метод захтева постојање звезда у позадини, када се планете траже овом методом најчешће се посматрају звезде у правцу центра галаксије.

Када се нека звезда са планетом нађе између звезде у позадини и Земље, могуће је детектовати планету користећи овај ефекат. Посматрач који жели да нађе планету користећи ову методу би посматрао неку звезду у временском периоду од пар дана, и посматрао би ефекат гравитационог сочива који се ствара. Ако посматрана звезда има планету, њена маса ће такође кривити светлост, што се може детектовати.

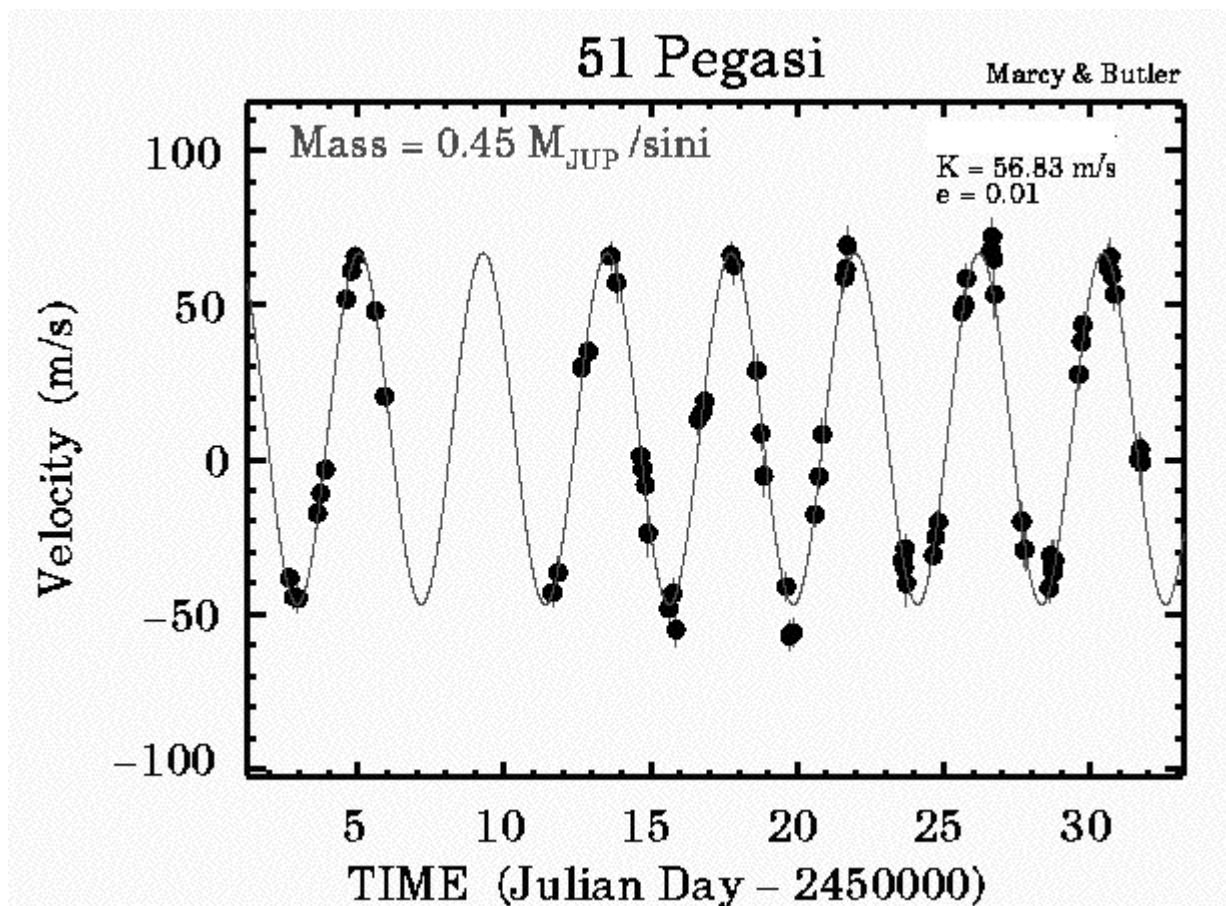
Овом методом су детектоване једне од првих планета са масама сличним Земљи у орбитама око звезда сличних Сунцу.

2.5. Радијална брзина

Највише планета се откривало овом методом до 2013. године. У теорији, налажење планете овом методом није компликован процес. Довољно је посматрати звезду током временског периода од неколико дана и регистровати промене у спектру звезде. Пошто су брзине које треба детектовати реда величине $100 \frac{m}{s}$ и мање, потребни су веома прецизни инструменти. Модерни спектрометри инсталирани на највећим светским опсерваторијама могу да детектују брзине од око $3 \frac{m}{s}$. Ради поређења, посматрач ван соларног система би могао да детектује да око Сунца обилази Јупитер, који тера Сунце да се креће брзином од $13 \frac{m}{s}$. Али, тај исти посматрач не би могао да детектује постојање Земље, због које се Сунце креће брзином од $7 \frac{cm}{s}$.



Слика 4: Објашњење зашто је могуће детектовати планету користећи радијалну брзину.



Слика 5: пример графика зависности радијалне брзине звезде од протеклог времена.

График радијалне брзине у зависности од времена ће бити синусоида зато што посматрач на Земљи може да посматра радијалну брзину звезде која је једна компонента праве брзине звезде која зависи од фазе звезде и њене брзине.

Једна од главних предности ове методе је лакоћа детекције планета. Планете сличне Јупитеру које орбитирају близу матичних звезда се могу детектовати без потешкоћа. Велика ефикасност ове методе је главни разлог зашто је она врло популарна. Радијалном брзином могуће је прецизно одредити орбитални период планете. У системима са више планета, са довољно дугим временом посматрања могуће је одредити орбитални период сваке планете.

У реалности планетарни системи не морају да буду паралелни са визуром. Угао између равни у којој орбитирају планете и равни нормалне на визуру се назива инклинација. Вредност овог угла је веома битна за посматрања радијалне брзине, јер ако је систем нагнут под неким углом у односу на визуру, нећемо мерити праву радијалну брзину, већ

њену компоненту која је сразмерна $\sin i$, где је i инклинација система. Ово знатно ограничава могућност процене масе планета (могуће је одредити масу планете до на $\sin i$).

Такође, раздаљина на којој је могуће измерити спектар звезде је ограничена. Иако је у ретким случајевима могуће наћи планету удаљену и пар хиљада светлосних година од Земље, због потешкоћа у сликању спектра већина планета детектованих овом методом су доста ближе, до пар стотина светлосних година.

Такође, прецизност спектра може бити смањена ротацијом звезде, или, у случају да је звезда таква, њеним пулсацијама.

Овом методом је најлакше детектовати планете у системима где је однос масе звезде и планете што већи. Зато је налажење планете сличне Земљи у орбити звезде сличне Сунцу веома тешко, али је знатно лакше наћи планету масе сличне Земљи у орбити око црвеног патуљка.

2.6. Транзитна фотометрија

Транзитна фотометрија је метода која се заснива на посматрању светлости звезде и тражења евентуалног пада њеног сјаја услед преласка планете преко њеног диска. Због могућности симултаног посматрања више звезда одједном и могућности налажења планета сличних Земљи ова метода је тренутно убедљиво најпопуларнија.

За коришћење ове методе потребно је посматрати звезду током периода времена и посматрати да ли се њен сјај мења. У неком идеалном случају, планета ће прећи тачно преко те звезде. Пошто је током транзита планета испред звезде, она ће блокирати део њене светлости, и звезда ће бити тамнија. Овај пад сјаја се може тривијално изразити преко односа пречника звезде и планете:

$$I_1 = I_0 \left(1 - \left(\frac{R_p}{R_z}\right)^2\right)$$

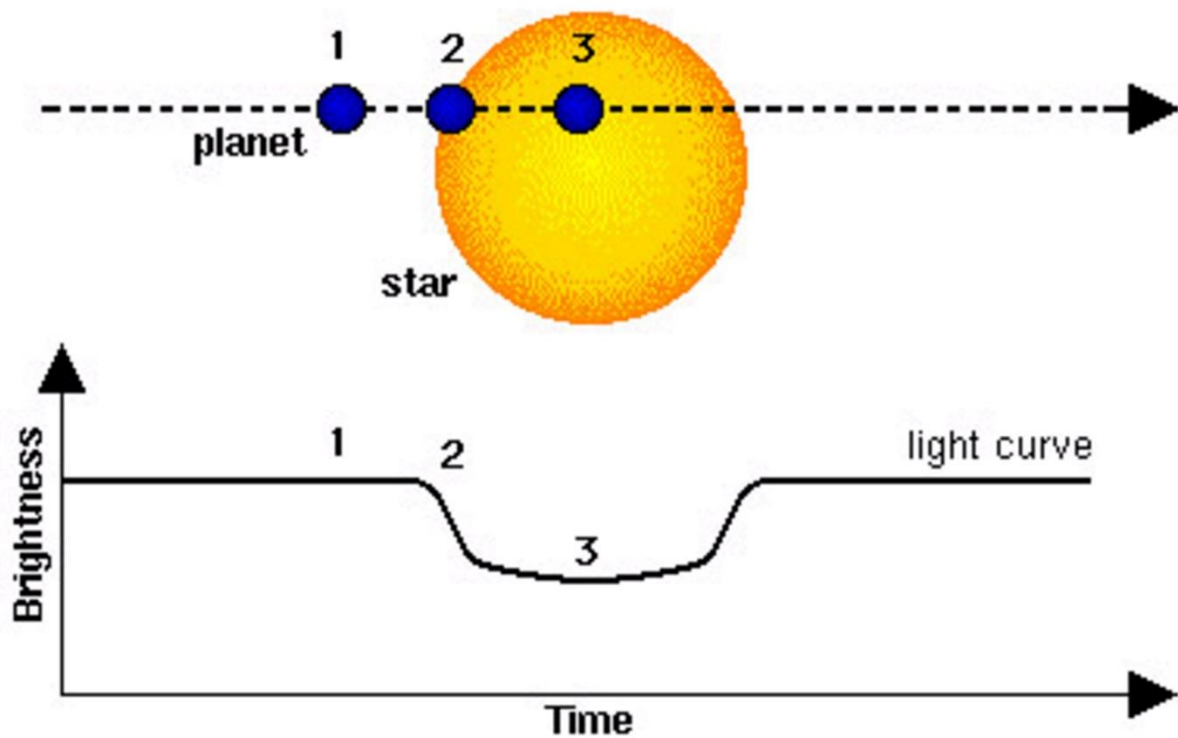
У овој једначини I_1 представља звездин флуks током транзита, I_0 представља звездин флуks, а R_p и R_z полупречнике планете и звезде, респективно. Ова једначина је може написати у другом облику који гласи:

$$\frac{R_p}{R_z} = \sqrt{1 - \frac{I_1}{I_0}}$$

У овој једначини члан под кореном са десне стране једнакости се назива дубина транзита, и може се директно измерити из посматрања. Ако знамо полупречник звезде, овако можемо наћи полупречник планете.

Још један параметар који се може измерити из посматрања је орбитални период планете. Најлакши начин његовог одређивања је посматрање звезде током дужег временског периода и мерење временског периода између узастопних транзита.

График који се добије када се на x-осу стави време а на y-осу нормализовани флуks звезде изгледа овако:



Слика 6: пример изгледа графика зависности флуksа од времена ако планета прелази преко звезде.

Овом методом се најчешће детектују планете ближе својој матичној звезди. Ово је последица чињенице да се транзит може детектовати ако планета прелази преко звезде, чије су шансе веће за ближу планету.

Такође, лакше је детектовати веће планете зато што ће оне блокирати више светлости од своје матичне звезде.

Баш због ових разлога је забележено доста транзита планета величина упоредивих величини Јупитера, који орбитирају јако близу својој звезди. Овакве планете се зову “врући Јупитери”.

Још једна мана ове методе је велики проценат грешака и лажних детекција. Овај проблем се може решити на пар начина. Могуће је користити неку другу методу као метод радијалне брзине да би се постојање планете потврдило, а такође је могуће посматрати звезду дуже време и гледање да ли ће се транзит опет десити.

Упркос овим недостацима, ова метода има огромне предности. Као прво, један телескоп може истовремено да посматра више десетина хиљада звезда и симултано тражи транзите у свакој. За овакав начин посматрања су најбољи телескопи у свемиру, који могу да гледају исти део неба. Ова могућност посматрања више звезда одједном надокнађује проблем са немогућношћу детектовања сваке планете у сваком систему.

Још једна предност ове методе је што се однос полупречника планете и звезде може одредити директно из криве сјаја.

Иако овај податак сам по себи не значи много, комбиновањем посматрања истог система са још неким методама нам омогућава да нађемо много више параметара. На пример, полупречник звезде се може одредити користећи паралаксу и интерферометрију, а посматрањем радијалне брзине звезде можемо одредити масу планете. Користећи полупречник планете и њену масу можемо наћи густину планете, што нам омогућава да наслутимо каква планета је у питању, а након одређивања удаљености планете од звезде може се наћи и њена температура.

2.7. Кинематика диска

Ова мање позната метода се заснива на проналажењу планета у протопланетарним дисковима. Протопланетарни дискови настају при креацији звезданог система. У центру оваквог система налази се протозвезда, око које се налази велики диск материјала. Новонастала планета ће кренути да скупља ту прашину, и направиће рупу у том протопланетарном диску, која се може детектовати.

2.8. Астрометрија

Ова метода, такође мање позната, заснива се на прецизном мерењу координата неке звезде. Пошто би сваки систем планета – звезда орбитирано око свог центра масе, теоретски, звезда би периодично мењала своје координате. Слично као и за претходну методу, налажење погодних услова за примењивање ових метода је веома тешко, тако да је јако мало планета нађено њима.

2.9. Варијација трајања транзита

Ова метода се заснива на чињеници да интеракција неког другог објекта може да утиче на дужину транзита планете. Ова метода је најчешће корисна у системима где постоји више звезда и где ће гравитација друге звезде приметљиво утицати на период транзита.

2.10. Статистика откривених планета

Метода открића	Број откривених планета
Транзит	3333
Радијална брзина	842
Гравитациона сочива	108
Сликање	52
Варијације времена транзита	21
Варијације времена помрачења	16
Варијације ротације пулсара	7

Светлост планете	6
Варијације пулсација променљивих звезда	2
Астрометрија	1
Кинематика диска	1

Табела 1: табела показује колико је егзопланета откривено којом методом.

Тренутно је потврђено постојање 4389 егзопланета и неколико хиљада које чекају потврђивање. Међу њима се налазе веома различите планете. Неке од њих су гасовити џинови попут Јупитера, који око својих матичних звезда орбитирају за мање од дан и чије површинске температуре превазилазе хиљаду степени целзијуса. Неке од њих су хладне планете које орбитирају далеко од своје звезде. Неке од њих су планете сличне Земљи у насељивој зони.

Гледајући ову табелу могуће је закључити које од горе описаних метода су најбоље за детектовање планета. У суштини, само методе транзита и радијалне брзине могу консистентно откривати планете.

Опсег полупречника планете	Број планета
$R \leq 1.25R_e$	421
$1.25R_e \leq R \leq 2R_e$	880
$2R_e \leq R \leq 6R_e$	1406
$6R_e \leq R \leq 15R_e$	486
$15R_e \leq R$	168

Табела 2: Табела показује колики су полупречници откривених планета. Ознака R_e се односи на полупречник Земље.

Опсег масе планете	Број планета
$M \leq 3M_e$	48
$3M_e \leq M \leq 10M_e$	162
$10M_e \leq M \leq 30M_e$	113
$30M_e \leq M \leq 100M_e$	99
$100M_e \leq M \leq 300M_e$	237
$300M_e \leq M$	400

Табела 3: Табела показује колике су масе откривених планета. Ознака M_e се односи на масу Земље.

Cumulative Detections Per Year

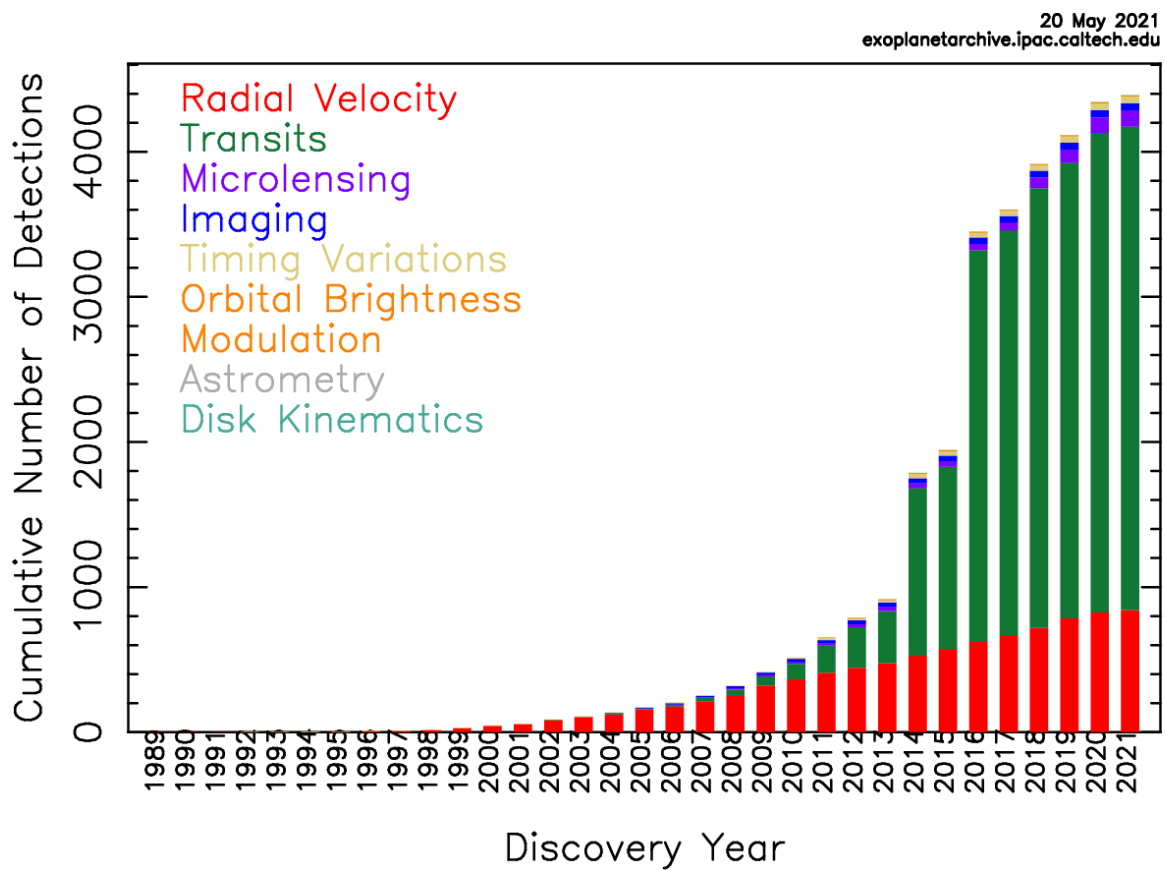


График 1: График показује укупан број планета детектованих различитим методама.

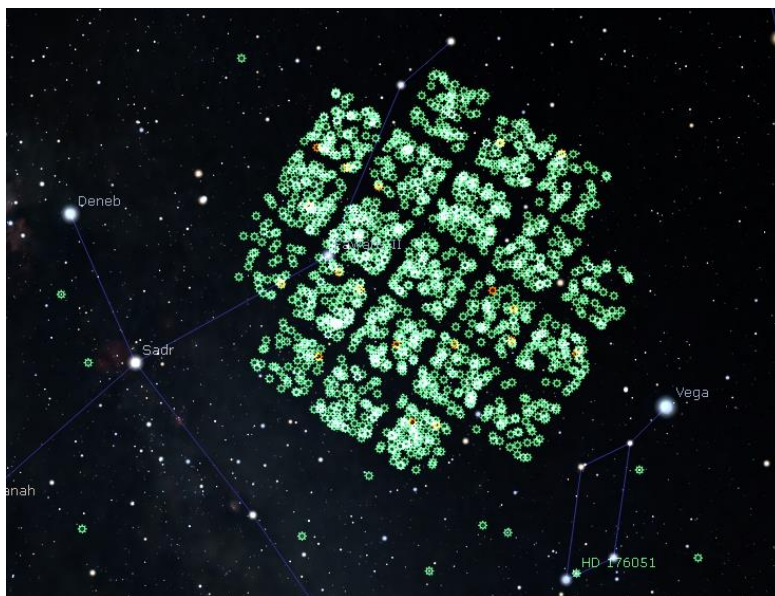
2.11. Мисије Кеплер и ТЕСС

Мисија Кеплер је једна од најбитнијих мисија везаних за егзопланете. Телескоп је лансиран у хелиоцентричну орбиту 2009. године, а престао је да функционише 2018. Из његових посматрања откривено је 2662 егзопланете.

Главни циљеви мисије су:

- одређивање дела планета сличних Земљи које су у насељивој зони,
- налажење орбиталних елемената ових планета,
- процена борја планета у системима са више звезда,
- одређивање карактеристика “Врућих Јупитера”,
- идентификација додатних чланова већ постојећих планетарних система,
- одређивање карактеристика звезде које имају планете.

Као мету посматрања одређено је фиксно видно поље у сазвежђу Лабуд. Кеплеров примарни фотометар је могао да посматра сто педесет хиљада звезда у исто време, а укупно је посматрао више од пет стотина хиљада.



Слика 7: видно поље Кеплера. Слика је *screenshot* из програма “Stellarium”.

Овај режим рада је прекинут када су 2 од 4 жирокопа на телескопу отказала. Телескоп је изгубио способност да континуално гледа исти део неба. Кеплеров режим рада је промењен тако да гледа у нове делове неба на еклиптици, како би притисак сунчевог

зрачења био минимализован. Телескоп је гледао у један део неба око 80 дана, па се окренуо користећи комбинацију потисника и остала 2 жироскопа и гледао други, све време гледајући у супротном смеру од Сунца. Мисија је завршена тридесетог октобра 2018. када је сво гориво за потиснике било потрошено и телескоп више није могао да одржава оријентацију.

Након престанка рада Кеплера, улогу примарног телескопа за посматрање егзопланета преузео је ТЕСС, лансиран 2018. године. Ова мисија функционише другачије од Кеплера. ТЕСС гледа 200000 најсветлијих звезда на небу, гледајући сваку барем 27 дана. За посматрање целог неба потребно је две године. ТЕСС је за сада открио 126 планета са још 2686 кандидата.

3. Обрада посматрања спектра звезде и транзита

У овом делу рада ћу се бавити посматрањима и њиховом обрадом у циљу проналажења параметара система.

3.1. Увод о посматрању и опреми

У овом делу рада ћу се бавити могућим поступком којим се могу проценити параметри звезде и планете.

Конкретна посматрања сам вршио ван Београда, близу Авале, у ноћи између 9. и 10. маја. Иако је време било ведро, јаки налети ветра су утицали на квалитет слика. Током сликања звезда је била аутоматски праћена. Систем је пре почетка сликања био добро фокусиран и колимисан.

У временском периоду од око 11:00 увече до 2:30 ујутру сликао сам спектар звезде и један део транзита. Тренутно ћу се бавити посматрањима спектра.

Подаци о телескопу:

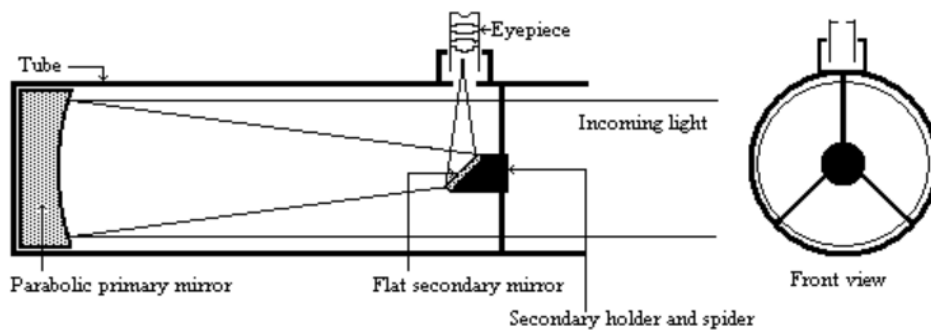
Назив телескопа	Sky-Watcher 200PDS
Тип телескопа	Њутнов рефлектор
Жижна даљина	1000mm
Пречник примарног огледала	203mm

Табела 4: Подаци о телескопу. У литератури ће се налазити линк са додатним информацијама о телескопу.

Подаци о примарној камери:

Назив камере	Никон Д90 (Nikon D90)
Дужина/ширина једног пиксела	5.5 μ m
Број пиксела на x-оси	4288
Број пиксела на у-оси	2848

Табела 5: Подаци о камери. У литератури ће се налазити линк са додатним информацијама о камери.



Слика 8: Шематски приказ Њутновог рефлектора.

3.2. HD 189733 и њена планета HD 189733b

HD 189733 је двоструки звездани систем у сазвежђу Лисице. Примарна компонента система (која има планету) је наранџасти патуљак, док је секундарна компонента црвени патуљак. Због доста мањег сјаја црвеног патуљка, његов сјај биће занемарен током касније обраде.

Планета HD 189733b је планета која је мало већа од Јупитера, која око своје звезде обилази приближно свака 2 дана. Температуре у горњој атмосфери прелазе 1000 °C. Такође је друга планета на којој је откривена водена пара.





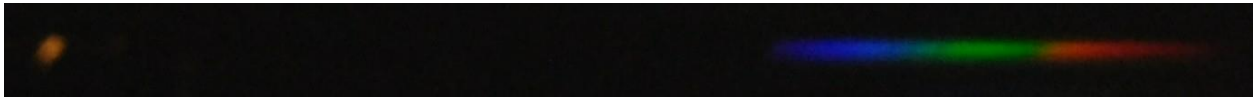
Слике 9 и 10: Локације HD 189733. Слике су *screenshot* из програма “*Stellarium*”.



Слика 11: Слика коју сам усликао док сам проверавао да ли сам добро нашао мету. Посматрана звезда је заокружена црвеним кругом. Магличаста мрља близу центра слике је планетарна маглина M27.

3.3. Посматрање спектра звезде и одређивање температуре звезде

Први корак у налажењу параметара звезде је сликање њеног спектра. Ово сам постигао стављањем дифракционе решетке пар центиметара испред сензора камере и сликањем. Након пар покушаја успео сам да сликам задовољавајућу слику:



Слика 12. Посматрана звезда се налази на левом крају слике, а њен спектар десно.

Следећи корак захтева одређивање где је максимум зрачења ове звезде. Овај процес је испро компликованији него што сам очекивао из неколико разлога: ниједна камера не може да региструје сваки фотон који удари у њен сензор. Процент фотона који буде регистрован зове се квантна ефикасност. Ова вредност није константна, већ зависи од таласне дужине светлости и различита је за сваку боју на сензору. Другим речима, може се десити (специфично на слици између плаве и зелене, и зелене и плаве боје) да пиксели који детектују једну и другу боју детектују фотоне исте таласне дужине, при чему ће их пиксели за различиту боју детектовати са различитим квантним ефикасностима. Олакшавајућа околност је што ми је потребна само таласна дужина максимума, а не интензитет зрачења у том максимуму.

Због ограничења опреме и чињенице да овакво мерење не може да буде веома прецизно, одлучио сам да ово мерење вршим на сваких $25nm$ спектра. Ово су резултати:

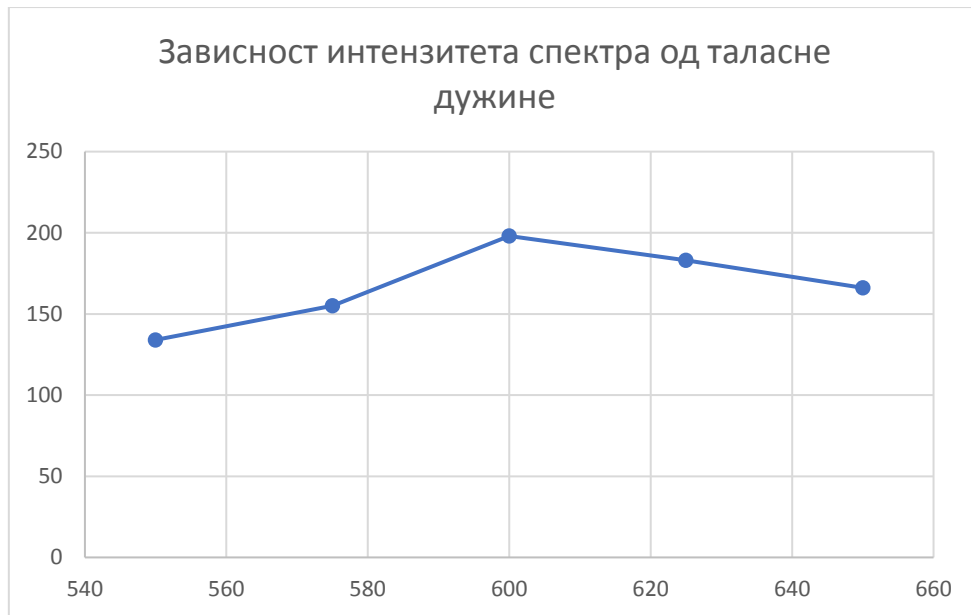


График 2: Зависност интензитета спектра (арбитрарне јединице) од таласне дужине, изражене у нанометрима.

Видевши да је максимум негде око 600nm , одлучио сам да мало прецизније рачунам вредности око 600nm .

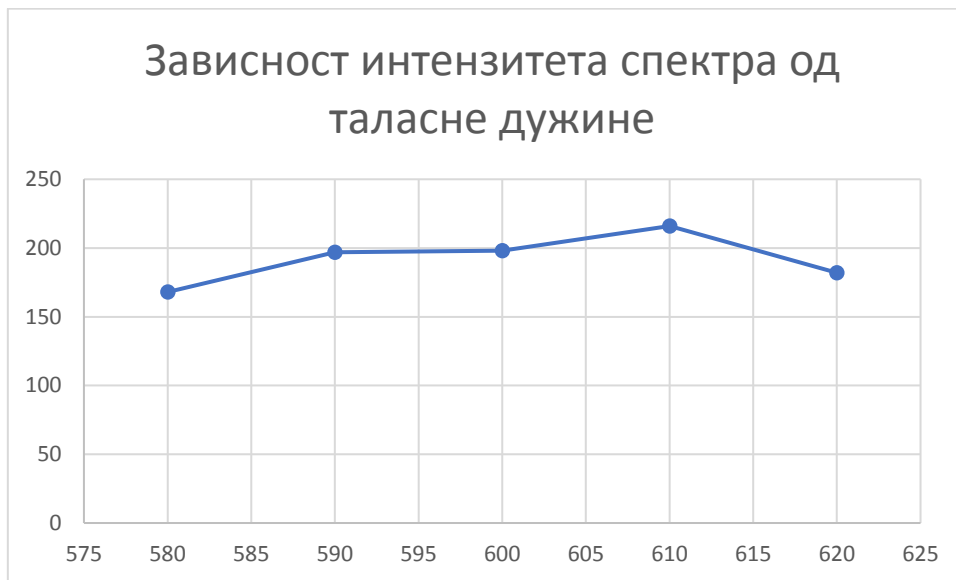


График 3: Зависност интензитета спектра (арбитрарне јединице) од таласне дужине.

Из овога можемо закључити да је

$$\lambda_{max} \approx 610 \pm 10 \text{ nm}$$

Помоћу ове вредности можемо израчунати температуру звезде користећи Винов закон:

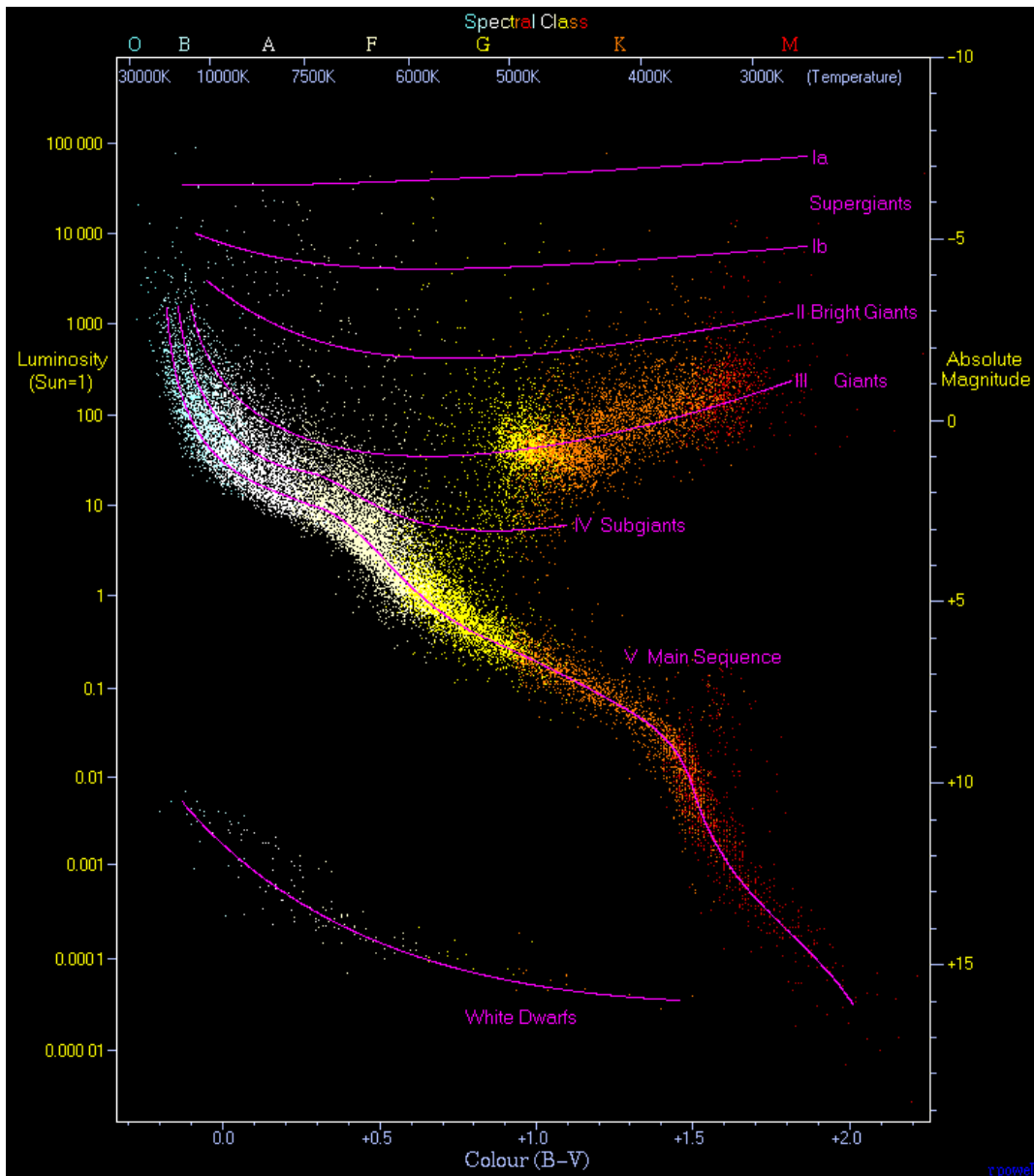
$$T_{eff} \cdot \lambda_{max} = 2.897 \cdot 10^{-3} m \cdot K$$

$$T_{eff} = 4750 \pm 80 K$$

Добијена вредност температуре указује на то да је звезда мало хладнија од Сунца и да је мало жућа од Сунца.

3.4. Хертцшпунг-Раселов дијаграм, релација маса-сјај и одређивање луминозности, масе и полупречника звезде

Хертцшпунг-Раселов дијаграм, или ХР дијаграм, је дијаграм на коме се налазе звезде у зависности од њихове температуре и луминозности / апсолутне магнитуде. Значај овог дијаграма је у томе што се одређене звезде налазе на одређеним деловима графика. Звезде које пролазе кроз нормалну фузију, као Сунце, се зову звезде главног низа. На графику главни низ је скоро па права линија:



Слика 12: Хертцшпунг-Раселов дијаграм. Посматрана звезда се налази на главном низу.

С обзиром да је ова звезда на главном низу могуће је проценити њене вредности луминозности преко температуре користећи се формулама из доле наведеног научног рада који се бави Хертцшпунг-Раселовим дијаграмом и даје аналитичке релације за тај дијаграм.

Прво ћу помоћу температуре израчунати колор индекс (формула 49 у раду):

$$T = \frac{7360}{(B - V) + 0.641} K$$

У овој формули T представља температуру звезде, а $(B - V)$ колор индекс. Колор индекс звезде је линеарна мера боје звезде, већи колор индекс одговара црвеној звезди, а мањи плавој.

Ова једначина се може написати у облику:

$$(B - V) = \frac{7360K}{T} - 0.641$$

$$(B - V) = 0.91 \pm 0.03$$

Колор-индекс се даље може превести у луминозност (формула 24 у раду):

$$\log_{10} \left(\frac{L}{L_s} \right) = -26.63 + 3.083 \cdot \ln \left(\frac{7360.9}{(B - V) + 0.6411} \right)$$

$$\log_{10} \left(\frac{L}{L_s} \right) = -0.53 \pm 0.06$$

$$L = 0.3 \pm 0.04 L_s$$

У овој једначини L представља луминозност звезде, а L_s луминозност Сунца.

Пошто сада знамо луминозност и температуру звезде, можемо наћи њен полупречник помоћу Штефан-Болцмановог закона:

$$L = 4R^2\pi\sigma T^4$$

Ради лакшег налажења полупречника преко пречника Сунца можемо написати ову једначину у облику:

$$\frac{L}{L_s} = \frac{R^2}{R_s^2} \cdot \frac{T^4}{T_s^4}$$

$$R = 0.81 \pm 0.08 R_s$$

У овој једначини R је полупречник звезде, R_s је полупречник Сунца, T је температура звезде, а T_s температура Сунца.

Маса звезде се може одредити из релације маса-сјај:

$$\frac{L}{L_s} = \left(\frac{M}{M_s}\right)^4$$
$$M = 0.74 \pm 0.02 M_s$$

У овој једначини M је маса звезде, а M_s је маса Сунца.

3.5. Удаљеност система

Користећи добијену луминозност звезде и њену познату привидну магнитуду могуће је одредити удаљеност овог система. Први корак у овоме је одређивање апсолутне магнитуде звезде. Ово се може наћи користећи Погсонов закон:

$$M - M_s = 2.5 \log \left(\frac{L_s}{L_z}\right)$$
$$M = 6.14 \pm 0.14$$

У овој једначини M је апсолутна магнитуда звезде, а M_s апсолутна магнитуда Сунца.

Друга потребна формула повезује апсолутну магнитуду, привидну магнитуду (чију вредност сматрам познатом) и удаљеност звезде:

$$M = m + 5 - 5 \log (r[pc])$$
$$r = 20.32 \pm 1.35 pc$$

У овој формули r представља удаљеност система, изражену у парсецима, а m привидна магнитуда звезде. Привидна магнитуда је бездимензиона мера придивног флукса звезде, а апсолутна магнитуда је вредност привидне магнитуде звезде за посматрача на удаљености $10pc$ од посматраног објекта.

3.6. Параметри планете

Пре посматрања спектра усликао сам 439 слика звезде као покушај сликања транзита планете преко звезде. Сlike су процесиране у програму AstroImageJ који је на основу тих слика тражио релативан сјај звезде и поредио га са сјајем других звезда. Након тога сам добио овај график:

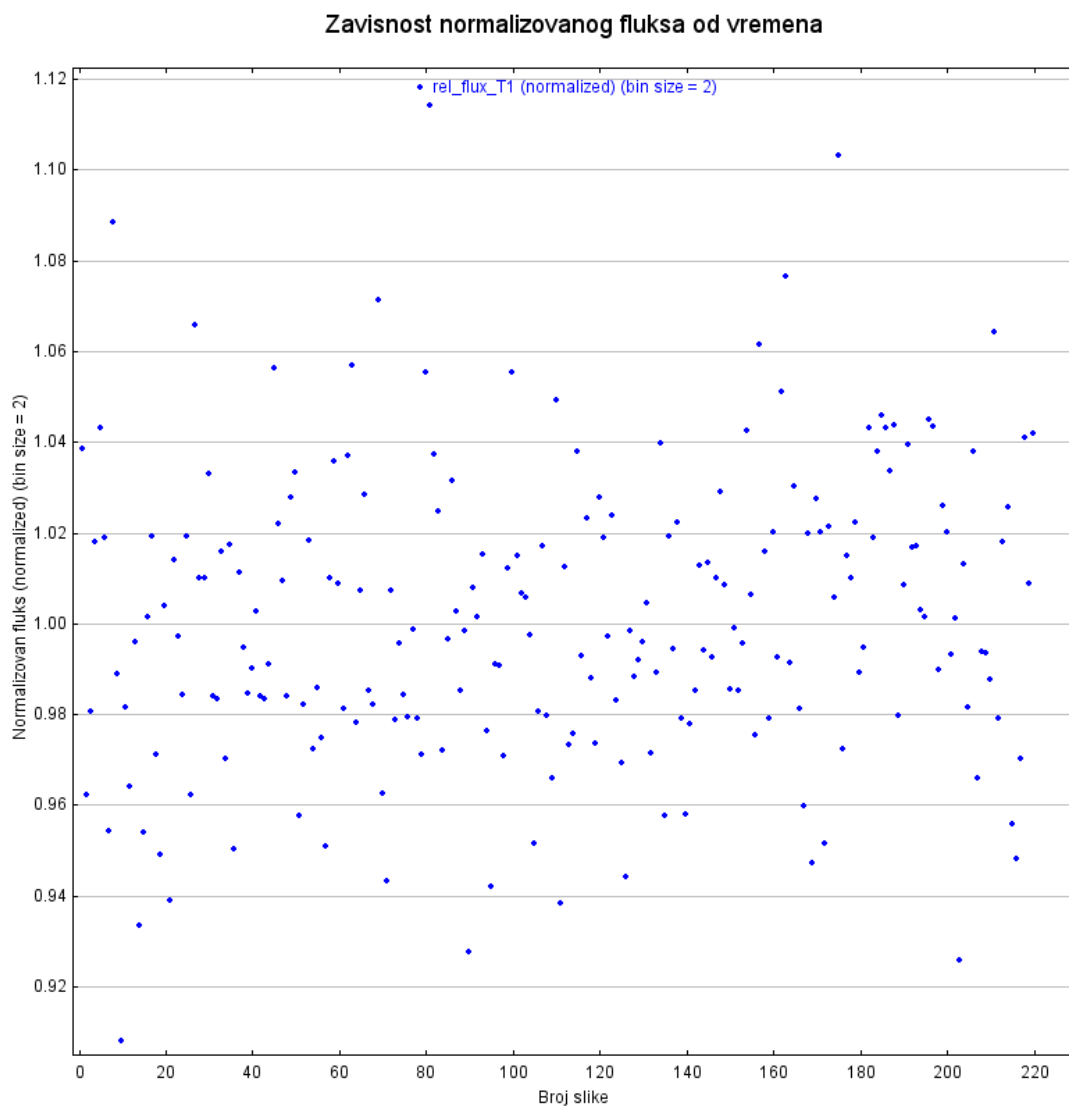


График 4: плот нормализованог флукса звезде у зависности од слике.

Због немогућности посматрања више од половине транзита (звезда је била блокирана дрветом), ветра и неоптималне опреме за посматрање транзита, подаци су прилично лоши. Ипак, иако подаци нису прецизни, знајући да сам кренуо сликање током средине транзита, можемо проценити однос флуксева на почетку и крају снимања рачунајући

средњу вредност нормализованих флуксева на почетку и крају снимања, па на основу тога израчунати дубину транзита. Добијена вредност износи:

$$D = 0.021 \pm 0.09$$

Одакле је:

$$R_p = 0.15 \pm 0.02 \quad R = 0.12 \pm 0.03 \quad R_s = 1.17 \pm 0.29 \quad R_j$$

У овој једначини R је полупречник звезде, а R_j је полупречник Јупитера.

Због немогућности одређивања периода планете, мораћу да узмем ту вредност са интернета (2.22 дана).

Пошто је маса планете знатно мања од масе звезде, могуће је занемарити њену масу у поређењу са масом звезде па можемо наћи удаљеност планете од звезде користећи трећи Кеплеров закон:

$$\frac{a^3}{T^2} = \frac{GM_s}{4\pi^2}$$

$$a = 0.03 \pm 0.01 \text{ AU}$$

У овој једначини a је удаљеност планете од звезде (сматра се да је орбита кружна), T је период, G је гравитациона константа, а M_s маса звезде.

4. Закључак

У оквиру овог рада разматране су неке од познатијих и битнијих метода детекција егзопланета, и рађено је са правим подацима. Из мерења спектра добијене су следеће вредности:

/	Добијена вредност	Прихваћена вредност
Маса звезде	$0.74 \pm 0.02 M_s$	$0.846_{-0.049}^{+0.068} M_s$
Луминозност звезде	$0.3 \pm 0.04 L_s$	$0.328 \pm 0.011 L_s$
Полупречник звезде	$0.81 \pm 0.08 R_s$	$0.805 \pm 0.016 R_s$
Удаљеност система	$20.32 \pm 1.35 pc$	$19.72 \pm 0.02 pc$
Температура	$4750 \pm 80 K$	$4875 \pm 43 K$

Табела 6: табела добијених вредности.

Иако је добијена маса знатно мања, највероватније због чињенице да релација маса-сјај није доста прецизна, остале вредности су веома прецизне, налазећи се у неколико процената од прихваћених вредности, што је помало неочекивано због непрецизног начина обраде коришћених података.

Из мерења параметара транзита планете преко звезде добијене су следеће вредности:

/	Добијена вредност	Прихваћена вредност
Полупречник планете	$1.17 \pm 0.29 R_j$	$1.14 \pm 0.03 R_j$
Полупречник орбите	$0.03 \pm 0.01 AU$	$0.031 AU$

Табела 7: табела добијених вредности

Уколико би се овај процес радио у оптималним условима, изгледао би овако:

Прво би се транзит посматрао из опсерваторије. Тако добијени подаци би били прецизни, направио би се модел транзита, па би се вредности полупречника планете могле прецизније и тачније одредити. Удаљеност система би била измерена преко тригонометријске паралаксе, па затим апсолутна магнитуда, луминозност и маса.

У оквиру овог закључка бих желео да дам грубу процену температуре ове планете. Ово ћу одредити помоћу претпоставки да је алbedo планете сличан алbedу Јупитера (0.52) и да је систем у стању равнотеже.

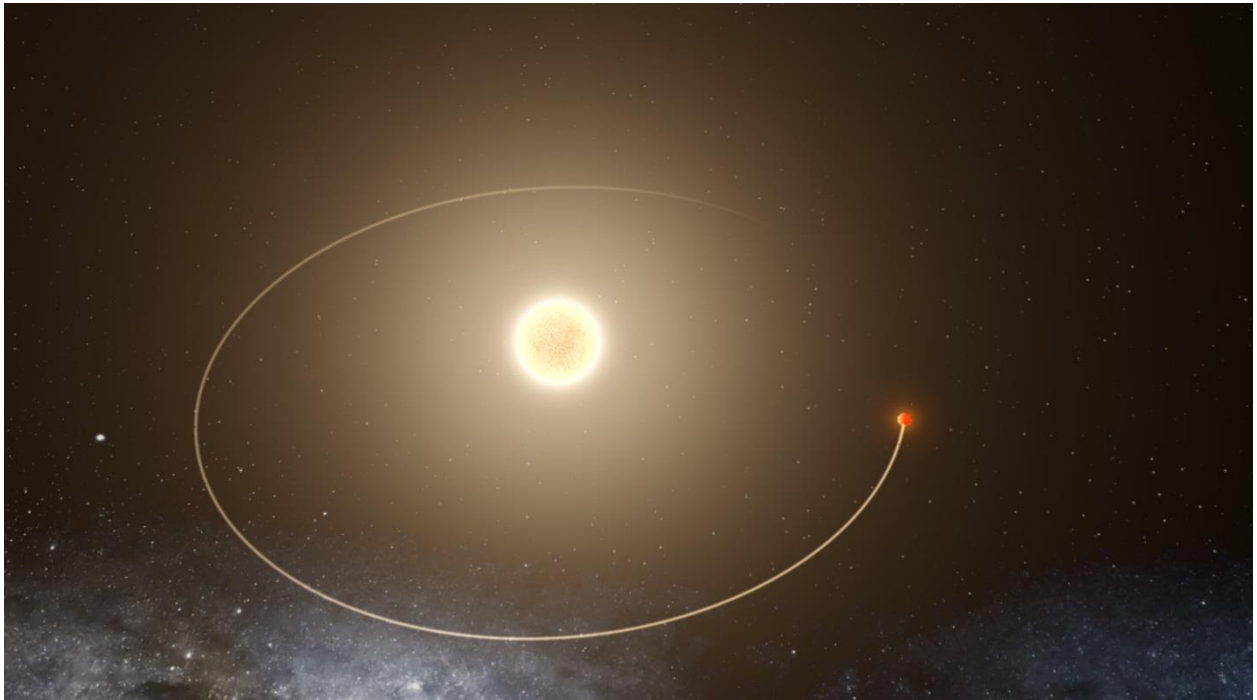
Потребно је изједначити енергију коју планета прима од звезде и енергију коју она емитује назад у свемир.

Енергија коју планета прима од звезде се може наћи помоћи формуле:

$$E = \frac{L}{4\pi a^2} \cdot R_p^2 \pi$$

Део ове енергије се рефлектује у свемир, а део бива израчен у свемир:

$$E = (1 - \alpha) \cdot 4R_p^2 \pi \sigma T_p^4$$
$$T \approx 1070K$$





Слике 13 и 14: симулиран изглед система HD 189733. Симулација направљена у програму “Universe Sandbox”.

4. Литература

<https://exoplanets.nasa.gov/news/1605/observing-exoplanets-what-can-we-really-see/>

<https://www.science.org.au/curious/space-time/gravitational-lensing>

<https://www.cfhtlens.org/public/what-gravitational-lensing>

<https://faculty.uca.edu/njaustin/PHYS1401/Laboratory/exoplanet.html>

http://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/How_to_find_an_extrasolar_planet

https://www.nasa.gov/mission_pages/kepler/overview/index.html

<https://www.nasa.gov/tess-transiting-exoplanet-survey-satellite>

<http://skywatcher.com/product/bkp-p200-ds/>

https://en.wikipedia.org/wiki/Nikon_D90

<https://www.optics-trade.eu/int/telescopes/reflecting-telescopes/newtonian-telescopes.html>

<https://arxiv.org/pdf/0811.4524.pdf>

https://en.wikipedia.org/wiki/Mass%E2%80%93luminosity_relation

<https://exoplanets.nasa.gov/exoplanet-catalog/6876/hd-189733-b/>

https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/docs/counts_detail.html

<https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>