

Diskovi kozmičke prašine

Ledić, Ana

Master's thesis / Diplomski rad

2016

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:519494>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-24**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
FIZIČKI ODSJEK

SMJER: PROFESOR FIZIKE I INFORMATIKE

Ana Ledić

Diplomski rad

Diskovi kozmičke prašine

Voditelj diplomskog rada: izv. prof. dr. sc. Goranka Bilalbegović

Ocjena diplomskog rada: _____

Povjerenstvo: 1. _____

2. _____

3. _____

4. _____

Datum polaganja: _____

Zagreb, 2016.

Zahvale

Zahvaljujem se svojoj obitelji, na nesebičnoj podršci, razumijevanju, savjetovanju i usmjeravanju tijekom cijelog školovanja.

Sažetak

Ubrzanim razvojem istraživanja i pregleda neba u srednjem i dalekom dijelu infracrvenog spektra, znanstvenici su uvidjeli da kozmička prašina nije samo smetnja prilikom opažanja nebeskih tijela. Pojavio se vrlo veliki broj slika nebeskih tijela, npr. mladih zvjezdanih objekata, aktivnih galaksijskih jezgri, planetarnih maglica i smeđih patuljaka. S pojavom tih slika nebeskih objekata pregledi neba ušli su u potpuno novo doba. Formalno istraživanje se ne može nositi s ovako brzim razvojem te astronomija počinje stvarati vlastiti problem „velikih podataka“. Brzi rast podataka odvija se u tako kratkom vremenskom intervalu da se čak niti tehnike strojnog učenja ne mogu dovoljno brzo razviti, a da ujedno uspijevaju kvalitetno analizirati sve slike. Male razlike u slikama, primjerice, mladih zvjezdanih objekata i aktivnih galaksijskih jezgara ne doprinose rješavanju ovog problema. Astronomiji su još uvijek potrebni postupci vizualne klasifikacije podataka.

S ciljem rješavanja ovih problema, pokrenuti su projekti znanosti za građanstvo. Nakon kratkog uvoda u prvom poglavlju ovog rada, drugo poglavlje sadrži opise osnovnih ideja projekata znanosti za građanstvo. Predstavljeni su projekti u astronomiji. Čitatelj će se ukratko upoznati s najvećim astronomskim opažanjima od strane građana, kao i doprinosima strojnom učenju i modeliranju podataka. Iako pojedini stručnjaci smatraju *Stardust* prvim projektom znanosti za građanstvo u astronomiji, pravi razvoj astronomskih istraživanja u kojima sudjeluju građani započeo je *Galaxy Zoo* projektom, koji je u drugom poglavlju prikazan detaljnije. Nakon toga su opisana i najveća dostignuća *Supernova Zoo* projekta, a na kraju poglavlja predstavljen je *Zooniverse* projekt, koji koordinira većinu trenutno aktivnih projekata znanosti za građanstvo. Više informacija o znanosti za građanstvo u Europskoj Uniji nalazi se u Dodatku A.

Treće poglavlje počinje opisom osnovnih svojstava, postanka i raspodjele prašine u Svemiru. Nakon toga, fokus je na diskovima kozmičke prašine oko mladih zvijezda, a posebno na uvjetima koji ove diskove čine pogodnima za stvaranje planeta. Čitatelj će se upoznati s teorijama koje nastoje objasniti procese nastanka planeta te s pregledima neba teleskopima i svemirskim letjelicama. Četiri istraživanja, prikazana u ovom poglavlju, odabrana su zbog važnosti informacija koje generiraju o kozmičkoj prašini, kao i zbog otkrića i promatranja egzoplaneta. Na kraju trećeg poglavlja predstavljena je fuzija svih prikazanih fenomena: *Disk Detective* projekt. Ovaj projekt znanosti za građanstvo oslanja se

na volontere za otkrivanje diskova kozmičke prašine u blizini mladih zvijezda, a s ciljem pronalaska egzoplaneta i planetarnih sustava u blizini tih zvijezda. U ovom dijelu rada prikazani su detalji o projektu, dosadašnja dostignuća, kao i postupci određivanja dobrog kandidata za mladu zvijezdu s diskovima kozmičke prašine koji bi mogli sadržavati planetarne sustave.

U četvrtom poglavlju prikazani su zanimljivi primjeri kandidata, odnosno naglašene su posebnosti u izgledu pojedinih objekata na slikama istraživanja koje sam pronašla tijekom rada na *Disk Detective* projektu. Također je prikazan udio pojedinih kriterija na postupak klasifikacije objekata kao dobrih kandidata za mladu zvijezdu s protoplanetarnim diskovima. Na kraju sam usporedila svoje rezultate s posljednjom objavom podataka od strane osnivača projekta. U posljednjem poglavlju su predstavljena zaključna razmatranja.

Disks of cosmic dust

Abstract

With rapidly increasing development of sky surveys in the mid and far-infrared spectra, scientists have finally realized that the cosmic dust is not merely a nuisance during celestial body observations. An invaluable set of new images of celestial bodies emerged. Perhaps most interesting so far are images of young stellar objects, active galactic nuclei, planetary nebulae, and brown dwarfs. Sky surveys have entered a whole new era. The formal research cannot cope with this rapid evolvement and astronomy started to face its own „Big data“ problem. The growth of data happens in such a short time span that even machine learning techniques cannot evolve fast enough to be able to follow up and successfully analyze all images. Extremely small differences between pictures of, for instance, young stellar objects and active galactic nuclei surely do not contribute to solving this problem. Astronomy still needs processes of visual classifications by human eye.

In the attempt of solving these issues, citizen science projects were initiated. After a brief introduction at the beginning of this thesis, the second chapter includes a description of basic concepts of "citizen science" phenomena. After that, focus shifts to citizen science projects in astronomy. The reader is briefly introduced to some major astronomical observations made by citizens, as well as to their contributions to the machine learning and data modelling. Although Stardust project is considered to be the first citizen science project in astronomy, the true evolution of crowd-sourced projects in astronomy began with Galaxy Zoo. Therefore, this project is introduced in more details. Achievements of *Supernova Zoo* are described. *Zooniverse*, that coordinates most of the currently active citizen science projects, is presented. More information about citizen science in European Union can be found in Appendix A.

The third chapter begins with the origin, properties, and distribution of dust in space. Afterwards, the focus will be on the disks of cosmic dust around young stars, and especially on conditions that make these disks suitable for planet formation. After a description of the

formation of planets, the reader will be briefly introduced to sky surveys, chosen because of the importance of their contributions to cosmic dust explorations, as well as to the search, detections and observations of exoplanets. At the end of the third chapter, the fusion of all these phenomena is presented: the *Disk Detective* project. This crowd-sourced project uses volunteers for detecting young stellar object and debris disks in the vicinity of young stars, in the hope of finding exoplanets and planetary systems. The ideas behind the project, achievements made so far, and the process of determining good candidates for young star with a disk are presented.

In the fourth chapter, I will show interesting cases with peculiarities in images that I found during my work on the *Disk Detective* project. I will also present overall influence of individual criteria in the process of determining good candidates. At the end, I am going to compare my results with the latest data release published by the project founders. In the last chapter, I will present some concluding remarks.

Sadržaj

1. Uvod.....	1
2. Znanost za građanstvo	2
2.1. Osnovne ideje	2
2.2. Projekti iz astrofizike.....	3
2.2.1. Astronomska opažanja	5
2.2.2. Galaxy Zoo projekt	9
2.2.3. Supernova Zoo	12
2.2.4. Zooniverse projekt	13
3. Diskovi kozmičke prašine	15
3.1. Kozmička prašina	15
3.2. Nastanak planeta	18
3.2.1. Protoplanetarni diskovi	19
3.2.2. Stjenoviti planeti	23
3.2.3. Divovski planeti.....	25
3.3. Teleskopi i pregledi neba	28
3.3.1. SDSS.....	28
3.3.2. DSS	30
3.3.3. 2MASS	31
3.3.4. WISE	32
3.4. Disk Detective projekt	34
3.4.1. Određivanje dobrog kandidata	36
3.4.2. Dodatne informacije o objektima	40
4. Rezultati rada na Disk Detective projektu.....	45
5. Zaključak	53
Dodatak A Znanost za građanstvo u Europskoj Uniji	54
A.1. Otvorena pitanja	56
A.2. Europska budućnost znanosti za građanstvo	58
A.2.1. Edukacija	59
A.2.2. Tehnologije	60
A.2.3. Evaluacija i procjena	60
A.2.4. Podaci	61
Literatura	62

1. Uvod

Iako su u posljednje tri i pol tisuće godina, od prvog zabilježenog astronomskog atlasa do danas, kreirane tisuće pregleda nebeskih tijela, rezultati na valnim duljinama infracrvenog spektra uspjeli su iznova iznenaditi profesionalne astronome. Prodiranjem kroz zrnca kozmičke prašine otkriveni su novi objekti i područja Svemira koja se nisu mogla kvalitetno promotriti u vidljivom dijelu elektromagnetskog spektra. Nakupine kozmičke prašine postale su novi izvori podataka o nastanku i razvoju asteroida, kometa, planeta, zvijezda, galaksija i Svemira općenito.

Pored mnoštva slika već poznatih svemirskih objekata, novi pregledi neba te istraživanja teleskopima i svemirskim letjelicama generirala su stotine milijuna slika nepoznatih objekata. Primjerice, samo WISE istraživanje generiralo je slike i SED dijagrame od preko 748 milijuna nebeskih tijela. S druge strane, prema podacima međunarodne astronomske zajednice, broj profesionalnih astronoma trenutno ne premašuje 15 000. Prema tome, kada bi svaki profesionalni astronom analizirao po 100 slika dnevno, ne bi dostajala niti cijela godina da se svi objekti WISE istraživanja propisno analiziraju i klasificiraju. Uzimajući u obzir količinu podataka koju na dnevnoj bazi generiraju trenutno aktivna istraživanja, kao i obujam podataka iz završenih istraživanja koje još treba analizirati, klasifikacija i analiza svih slika i dijagrama od strane profesionalnih astronoma postaje nemoguća. Srećom, razvoj tehnologija, web servisa i društvenih mreža potaknuo je komunikaciju i suradnju između profesionalnih astronoma i volontera zainteresiranih za sudjelovanje u znanosti. Osobe koje ne posjeduju formalno obrazovanje niti zvanje astronoma, a koje zanimaju istraživanja Svemira i nebeskih tijela, u zadnjih nekoliko desetljeća konačno mogu jednostavno dobiti uvid u trenutne potrebe astronomije, kao i najnovije tehnike promatranja, klasificiranja i analiziranja opaženih nebeskih tijela. Kako bi se ovim zainteresiranim pojedincima dodatno olakšao pristup i sudjelovanje u trenutno aktivnim astronomskim istraživanjima, kojima je pomoć građana zbog velikog obujma podataka izuzetno potrebna, u posljednjih dvadesetak godina pokrenuti su brojni projekti znanosti za građanstvo. Ovi projekti ne omogućuju samo sudjelovanje volontera u znanstvenim istraživanjima, već ujedno pojednostavljuju posao astronomima, omogućuju astronomskim institucijama fokusiranje na druga istraživanja, općenito uvelike doprinose astronomiji, napretku i popularizaciji znanosti, promičući i unaprjeđujući pritom koncept cjeloživotnog učenja.

2. Znanost za građanstvo

2.1. Osnovne ideje

Pojam „znanost za građanstvo“ (engl. *citizen science*), najkraće rečeno, podrazumijeva sudjelovanje građana u znanosti [1]. Jedan od prvih primjera datira još iz 1714. godine, kada je dr. Edmund Halley pozvao građane srednje Engleske na motrenje potpune pomrčine Sunca. Opažanja koja su dokumentirali građani nadomjestila su nedostatke u opažanjima znanstvenika sa Sveučilišta u Oxfordu i Cambridgeu. Naime, znanstvenici sa Sveučilišta u Cambridgeu uspjeli su dokumentirati veći dio pomrčine Sunca, ali im je promakao početak eklipse, kao i dio potpune pomrčine Sunca. S druge strane, znanstvenici sa Sveučilišta u Oxfordu nisu uspjeli detektirati mnogo zbog oblačnog vremena. Opservacije koje su dokumentirali građani pripomogle su dr. Halley-u prilikom korekcija pretpostavljene putanje eklipse kroz Englesku (originalna pretpostavljena putanja imala je odstupanje od približno 30 km). Također, tako korigiranu verziju putanje dr. Halley predstavio je 1716. godine pred *Royal Society* društvom. Verzija je sadržavala i zapise od strane građana, koji su prikazani na Slici 2.1.

(262)

Place	Observer	Beginn.	Immerf.	Emerf.	Tot.	End.
		h. m. s.	h. m. s.	h. m. s.	h. m. s.	h. m. s.
Barton	M. Bridges				3.53	
Bell-bar	M. Jones	8. 6.25	9. 9.45	9.13.27	3.42	
Broadway			8.47.00	8.49.30	2.30	
Carmarib.	M. Cotes			9.14.37		10.21.57
Cambridge	M. Gray	8.10.00				10.24.30
Canterbury						
Chester	M. Ward	7.57.40				10. 6.35
Crew	M. Wright.		9. 2. 8		2.00	10. 9.00
Dublin	L. Arch Bish.	7.42.11				9.49.40
Dublin	M. Hawkins	7.41.30				9.48.45
Exon	L. Bishop		8.55. 0	8.59. 0	4.00	10. 0.00
Exon	M. Hudson	7.47.30			3.30	10. 0.30
Greenwich	M. Flamsteed				3.11	
King's Wald.	M. Whitfield				3.52	
Llanidan						
Anglesey	M. Rowland	7.52.30				
London	R. Society	8. 6.00	9. 9. 3	9.12.26	3.23	10.20.00
Northampt.	M. Hawkins		9. 5.22	9. 9.24	4. 2.10	10.15.35
Norton-court	D. Harris	8. 8.55	9.13.23	9.14.22	0.59	10.24.47
Oxon	D. Keill				3.30	10.15.10
Paris	R. Academy	8.11.00				10.28.00
Plymouth	M. Heines	7.41.00	8.45.30	8.50.00	4.30	9.54.30
Portchester	C. Candler		9. 2.25	9. 6.15	3.50	
Salop	D. Hollings	7.58. 0			1.40	10. 6.00
Upminster	M. Derham	8. 7.41	9.10.58	9.14. 63. 8		10.21.45
Wansted	M. Pound	8. 6.37	9. 9.28	9.12.48	3.20	10.20.32
Weymouth	M. Hobbs		8.54.00	8.58.00	4.00	
Witley	M. Baxter	7.59. 0			3.15	10.13.00

Slika 2.1 Zapisi opažanja pomrčine Sunca koje su načinili volonteri 1714. godine. Slika preuzeta iz „*Philosophical Transactions: Observations of the Late Total Eclipse of the Sun on the 22d of April Last Past, Made before the Royal Society at Their House in Fleet*“

Više o definicijama pojma „znanost za građanstvo“, otvorenim pitanjima te predloženim mjerama koje bi trebale osigurati razvoj znanosti za građanstvo u Europskoj uniji nalazi se u Dodatku A.

2.2. *Projekti iz astrofizike*

Stalni napredak i sve veća dostupnost digitalnih tehnologija, uz jednostavnije dijeljenje podataka i olakšanu komunikaciju, omogućili su i češće sudjelovanje građana u istraživanjima u fizici. Od trenutno aktivnih projekata znanosti za građanstvo, koji se mogu svrstati u istraživanja u fizici, otprilike 80% čine projekti koji se odnose na astronomska istraživanja¹. Danas postoji jako aktivna zajednica dobro opremljenih amatera astronoma, koji značajno doprinose napretku astronomije [1]. Ovi pojedinci ne doprinose astronomiji samo promatranjem nebeskih tijela vlastitim teleskopima, već je obujam njihovih djelatnosti puno veći. U prvom dijelu ću ukratko predstaviti područja djelovanja i pokušati prikazati obujam djelatnosti amatera u astronomiji, a u nastavku ću detaljnije predstaviti konkretne projekte znanosti za građanstvo u astronomiji.

Najbrojniji doprinosi amatera astronomiji definitivno su u području opažanja i promatranja nebeskih tijela. Dobar dio ovih opažača posjeduje vlastite teleskope, a pojedini amateri toliko dobro poznaju određene dijelove neba, planeta ili nebule da gotovo trenutačno uoče promjene ili nove pojave. Tako su amateri promatrači otkrili ili sudjelovali u otkrivanju značajnog broja asteroida s putanjama blizu putanje Zemlje (engl. *Near-Earth Asteroids*), zatim asteroida u glavnom pojasu između Marsa i Jupitera te kometa. Planetarne atmosfere su zbog svoje veličine, svjetlosti, boja i visoke varijabilnosti oduvijek bile zanimljive promatračima, kako profesionalnim tako i amaterskim pa volonteri promatrači sudjeluju i u dugotrajnim promatranjima planeta. Promatranjem kretanja oblaka, valova, oluja, kao i utjecaja vjetrova na strukturu i procese planetarnih atmosfera, volonteri značajno doprinose boljem shvaćanju klime i meteorologije planeta Sunčevog sustava, a korištenjem vlastitih teleskopa građani djelomično i rasterećuju znanstvene institucije.

Pojedini amateri astronomi odlučili su se na video praćenje planeta i nebeskih tijela. Ovom metodom opažači amateri uspjeli su zamijetiti i neočekivane, kratkotrajne događaje

¹ Zooniverse projekt, koji koordinira trenutno aktivne projekte znanosti za građanstvo, obuhvaća 15 projekata iz područja fizike, od čega se 12 projekata odnosi na istraživanja u astrofizici.

poput sudara planeta i manjih objekata. Osim Sunčevog sustava, amateri opažači sudjeluju i u detekciji prolaska i mikro fokusiranju egzoplaneta. Nadalje, u vremenskom periodu od pet godina, čak dvije tisuće građana sudjelovalo je u promatranju zvijezda promjenjivog sjaja, unoseći pritom milijune opažanja u zajedničku, javnu bazu podataka.

Veliki su doprinosi od strane građana i na području konstantnog motrenja blazara. Kombinacija 40 amaterskih i profesionalnih optičkih i radio opservatorija, uz potporu *Fermi* i AGILE svemirskih teleskopa, rezultirala je sa preko 50 recenziranih objava od 1998. godine. Amateri se ne ograničavaju samo na našu galaksiju, već sudjeluju i u izvangalaksijskim opažanjima. Značajan je rad amatera u otkrivanju i ranoj karakterizaciji supernova. Od 2010. godine, astronomi amateri samostalno otkrivaju 150-180 supernova godišnje, što čini približno 10% od ukupnog broja tih otkrića. Svakako vrijedi spomenuti i gospodina Roberta Evansa, amatera astronoma, koji je samostalno vizualno identificirao čak četrdeset i dvije supernove. Iako je promatranje neba i nebeskih tijela teleskopima vjerojatno najpoznatija aktivnost amatera astronoma, ovi predani pojedinci ne zaustavljaju se na samom promatranju već su uključeni i u procese obrade i interpretacije prikupljenih podataka.

Bez obzira na značajne napretke na području strojnog učenja i računalnog vida, računala još uvijek ne mogu u potpunosti doseći ljudsku razinu vizualnog prepoznavanja uzoraka pa vizualna klasifikacija ostaje važan dio astronomije. Jedan od većih izazova današnjeg računarstva je prilagodba podataka postojećem modelu i obrnuto. Proces i tzv. „modeliranja podataka“ mogu sadržavati izuzetno komplicirane funkcije koje zahtijevaju ogromne računalne resurse. Neke funkcije mogu biti računalno neisplative jer, uz to što troše veliki dio resursa, njihovo izvršavanje traje predugo. S druge strane, ljudi na osnovu intuicije često mogu brže iz cijelog prostora, određenog parametrima modela, izdvojiti dijelove koji dobro odgovaraju podacima. Nažalost, upravljanje istraživačkim grupama na institucijama i ravnomjerna raspodjela raspoloživih sredstava često mogu dovesti do toga da se profesionalni znanstvenici fokusiraju na usko određene dijelove istraživanja, specijalizirajući se tako u određenim tehnikama ili skupovima podataka. Kada znanstvenik „zastrani“ s određenog smjera, tada se mogu pojaviti rizici s upravljanjem vremena i resursa, što u najgorem slučaju može biti presudno za karijeru.

Srećom, amateri nemaju ovih problema, budući da astronomiji pridonose u svoje slobodno vrijeme i u mogućnosti su posvetiti svoju pažnju temi koja ih zanima, bez obzira je li to područje isplativo ili ne. Također, osobe koje nisu uključene danonoćno u neki proces

u stanju su postaviti jako neobična pitanja, ili stvoriti veze i prijedloge kojih se izuzetno fokusirani profesionalni znanstvenici možda ne bi sjetili. Dakle, uz sama opažanja, građani sudjeluju i u klasifikaciji prikupljenih podataka, vizualnoj identifikaciji, modeliranju, ali i postavljanju kvalitetnih znanstvenih pitanja.

U nastavku ću navesti značajnija astronomska opažanja, odnosno objekte i pojave koje su detektirali astronomi amateri, a nakon toga i veće projekte kojima građani doprinose vizualnom identifikacijom, modeliranjem podataka, ili pak sudjelovanjem u forumima.

2.2.1. Astronomska opažanja

S obzirom na količinu volonterskih astronomskih opažanja, ustanovljen je protokol za otkrića novih pojava koje su uočene od strane amatera. Položaj novog objekta uspoređuje se s postojećim katalozima, ako se ne pronađu detalji o prijavljenom objektu, otkriće i efemeride objekta mogu se prijaviti na web stranicu međunarodnog astronomskog saveza, *Minor Planet Center*². Ako se opažanja ponove barem dvije noći, otkriću se dodjeljuje privremeni naziv, nakon čega se objavljuje ostalim korisnicima. Navedena stranica, uz obrazac za prijavu novih otkrića, sadrži i statistiku svih opažanja, otkrivenih Zemlji bliskih asteroida, malih tijela i kometa, kako na mjesečnoj i godišnjoj razini, tako i ukupno od osnutka stranice. Jedno od poznatijih otkrića prijavljenih i objavljenih na *Minor Planet Center* web stranici je zemlji blizak asteroid 2012 DA14. Ovaj asteroid prvi put je prijavio tim amaterskih opažača, članova *La Sagra Sky Survey* udruženja na astronomskom opservatoriju u Mallorci. Tek nakon što su amateri prijavili otkriće, profesionalni astronomi karakterizirali su asteroid tijekom najbližeg prolaska pored Zemlje, u veljači 2013. godine.

Većina amaterskih otkrića kometa je u pojasu koji je blizak Suncu, jer to područje nije u potpunosti pokriveno svemirskim teleskopima. Jedan od najpoznatijih primjera svakako je otkriće kometa C/2011 W3 (Lovejoy), koji pripada tzv. Kreutz obitelji kometa. Komet je otkrio amater astronom, gospodin Teddy Lovejoy u studenom 2011. godine, a karakterizacija kometa u Kreutz obitelj izvršena je od strane Središnjeg ureda za astronomske telegrame (CBAT). Zanimljiva je činjenica da je Lovejoy prvi komet iz Kreutz obitelji opažen nakon čak 40 godina. Amateri astronomi Vitalij Nevski i Artiom Noviĉonok, koristeći teleskop međunarodne znanstvene optičke mreže (ISON), otkrili su komet C/2012

² <http://minorplanetcenter.net/>

S1 (ISON) za kojeg se vjeruje da je potakao iz Oortova oblaka. Ovo otkriće pokrenulo je iznimno veliki broj promatranja prolaska ISON kometa kroz perihel od strane profesionalnih astronoma, što je dodatno potaknulo suradnju profesionalnih i amaterskih astronoma.

Amateri astronomi pridonose istraživanjima pod-kategorije malih objekata s mjerljivom i uočljivom komom, a koji orbitiraju unutar asteroidnog pojasa. Iako se inicijalno smatralo da su ovi objekti kometi, naknadna istraživanja pokazala su da je uglavnom riječ o asteroidima koji, prolaskom kroz perihel, intenzivno emitiraju hlapljive tvari. Kako je otkriće ovakvih objekata dodatno zamaglilo granicu između kometa i asteroida, Sveučilište u Rimu u suradnji s nekoliko amaterskih astronoma 2005. godine pokrenulo je T3 projekt, kojim se nastavilo otkrivati i ispitivati male objekte s uočljivom komom. Projekt je rezultirao detekcijom kome oko asteroida 2005 SB216 te otkrićem najmanje osam kometa u glavnom pojasu [1].

Uz otkrića kometa i asteroida, amateri astronomi doprinose i novim spoznajama o površinama i atmosferama planeta Sunčevog sustava. Iako su amateri uključeni u promatranja svih planeta Sunčeva sustava, ipak je najviše otkrića vezano za divovske planete. Primjerice, u slučaju Saturna dobar primjer je suradnja znanstvenog tima Cassini letjelice i amaterskih znanstvenika. U siječnju 2006. godine, Cassini letjelica nalazila se s tamne strane Saturna pa nije bila u mogućnosti direktno slikati površinu Saturna. Kako je letjelica detektirala emisiju radio valova, za koje se pretpostavljalo da su povezani sa munjama na površini, profesionalni astronomi zamolili su amatere za doprinos slika površine Saturna na spornom mjestu. U roku nekoliko minuta zaprimljene su stotine slika Saturna, snimljene amaterskim teleskopima. Zahvaljujući ovoj suradnji, u korelaciju su dovedeni detektirani radio valovi povezani s munjama i strukture slične oblacima koje su amaterski teleskopi snimili na Saturnovom disku, što se dalje nastavilo istraživati. Nakon toga, zajednica amaterskih opažača prva je primijetila erupciju ogromnog Saturnovog olujnog sustava, koja se dogodila u razdoblju 2010-2011, nakon čega je taj olujni sustav mjesecima nakon opažanja promatrao tim sastavljen od profesionalnih i amaterskih astronoma.

Amaterski znanstvenici brzo su uvidjeli prednosti video nadzora planeta i ostalih objekata, a koje omogućuje tzv. „sretno“ slikanje Jupitera. Iz cijelog video snimka odabiru se oštre slike s najboljom rezolucijom i spremaju se na zajednički server. Profesionalci u području programskog inženjerstva, a ujedno i amateri u astronomiji, razvili su „Registax“ i „Autostakker“ programe, koji omogućuju amaterima procesiranje video datoteka i odabranih

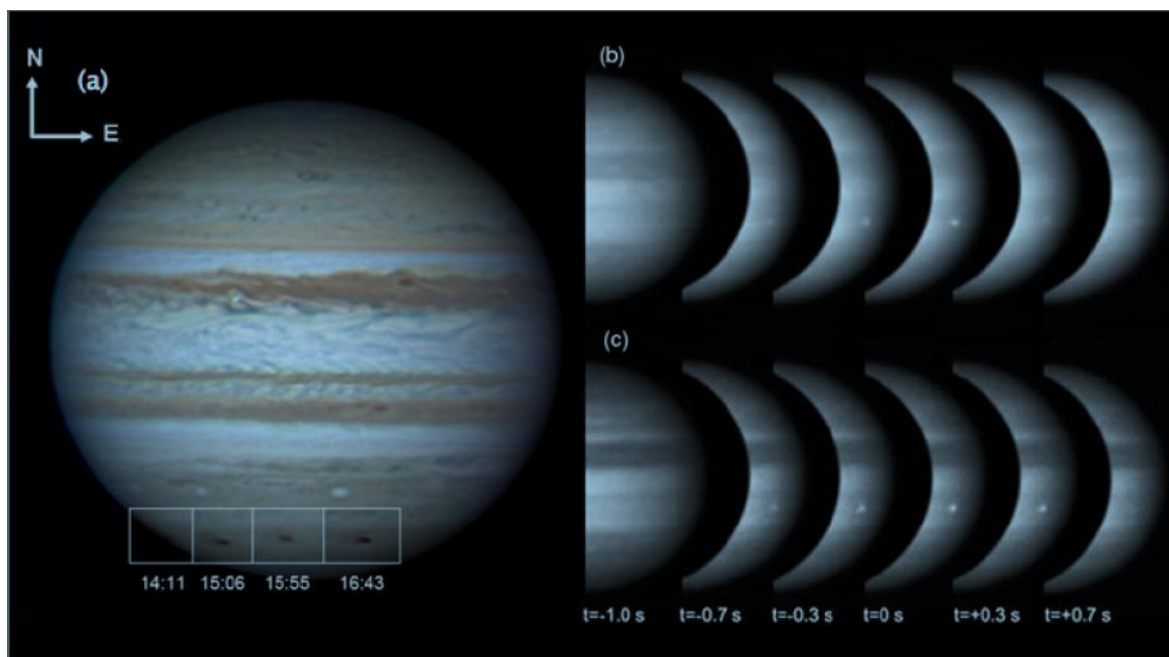
slika te korekciju distorzija nastalih zbog optike samih teleskopa. Postavljanje prethodno obrađenih slika na server uvelike smanjuje opterećenja samog servera, budući da bi postavljanje neobrađenih video datoteka zahtijevalo ogromnu količinu resursa i izuzetno usporilo učinkovitost istraživanja. Na koncu se iz obrađenih slika kreiraju opisni modeli morfoloških promjena površine Jupitera, opisi novih turbulentnih struktura i vremenskih fenomena, kao i zapisi dugotrajnih atmosferskih promjena. Ove zapise održavaju i ažuriraju organizacije građana znanstvenika, poput Britanskog astronomskog udruženja (engl. *British Astronomical Association*) ili pak Udruženja promatrača Mjeseca i planeta (engl. *Association of Lunar and Planetary Observers*).

Jedan od ljepših primjera doprinosa amaterskih opažača astronomiji je otkriće Anthonya Wesleya od 19. srpnja 2009. godine. Gospodin Wesley je, proučavajući slike Jupiterove površine blizu južne polarne regije, uočio ožiljak od udara. Naravno, ovo otkriće dovelo je do međunarodne kampanje profesionalnih opažanja, s ciljem identifikacije objekta koji se sudario s Jupiterom, uvjeta u kojima se sudar zbio, kao i eventualnih posljedica za veliki planet. Iako je udar iz 2009. bio nevidljiv sa Zemlje, minimalno tri bljeska su potvrđena između 2010. i 2012. godine. Znanstvenici su uspjeli stvoriti i svjetlosne krivulje, iz kojih su se potom određivale veličine i frekvencija objekata koji su se sudarili s Jupiterom. Otkriće gospodina Wesleya, kao i slike primijećenih triju bljeskova, prikazani su na Slici 2.2.

Veliki broj amatera u astronomiji uvidio je i važnost promatranja zvijezda promjenjivog sjaja. Kako bi otkrića ovih promatrača bila propisno kategorizirana, ali i s ciljem uklanjanja ponavljajućih istraživanja, stvoreno je Američko udruženje promatrača promjenjivih zvijezda (engl. *American Association of Variable Star Observers*) koje podržava i koordinira aktivnosti od preko dvije tisuće amatera. Unatoč imenu, dvije trećine AAVSO promatrača locirano je izvan SAD-a, što je pak omogućilo stvaranje globalne mreže malih teleskopa, okupljenih pod nazivom AAVSONet. Uz podršku i koordinaciju, ovo udruženje na svojim službenim stranicama³ nudi i materijale za učenje, katalog poznatih promjenjivih zvijezda, kao i alat za unos podataka s integriranim sustavom za detekciju pogrešaka. S ciljem osiguravanja kvalitete podataka, osoblje i volonteri dodatno provjeravaju ispravnost zaprimljenih podataka. Uz alate za analizu podataka, na stranicama se može pronaći alat za kreiranje svjetlosnih krivulja na osnovu unesenih podataka te alat za

³ <https://www.aavso.org/>

određivanje perioda sjaja. Podaci AAVSO zajednice često se koriste u istraživanjima profesionalnih astronoma jer ovo udruženje uvijek nudi najažurnije svjetlosne krivulje promjenjivih zvijezda. Dodatno, AAVSO amateri sudjeluju u profesionalnim astronomskim istraživanjima, objavljuju rezultate u priznatim časopisima, izdaju vlastiti časopis, a direktno ih podupiru NSF, NASA i *Sky & Telescope* organizacije. Već prvim pogledom na službene stranice, moguće je uvidjeti da su amateri astronomi AAVSO zajednice jedan od vodećih pokazatelja koliko sudjelovanje entuzijastičnih i sposobnih volontera doprinosi znanosti.



Slika 2.2 Doprinosi astronoma amatera promatranjima sudara u Jupiterovom sustavu. (a) Tamni ožiljci od sudara u Jupiterovoj atmosferi, koje je snimio gospodin Anthony Wesley 19. srpnja 2009., (b) evolucija udara manjeg meteora, 3. srpnja 2010. na crvenim valnim duljinama, također snimio gospodin Wesley, (c) evolucija udara, snimljena na plavim valnim duljinama. Evoluciju udara snimio je Christopher Go. Slika je preuzeta iz „Ideas for citizen science in Astronomy“[1].

2.2.2. *Galaxy Zoo projekt*

Galaxy Zoo vjerojatno je najpopularniji znanstveni projekt čiji su glavni akteri građani. Projekt je nastao 2007. godine, kao rješenje sve brojnijih zahtjeva za morfološkom klasifikacijom galaksija.

Povećavanjem broja teleskopa, svemirskih letjelica i istraživanja općenito, količina astronomskih podataka i slika objekata toliko je brzo rasla da su znanstvenici već prije 30 godina predviđali da profesionalni astronomi zbog količine podataka neće moći klasificirati čak niti veći broj galaksija. Kako bi se što bolje pripremili za ovaj problem, znanstvenici poput Lahava 1995., a kasnije i Balla 2004. godine, nastojali su osmisliti kvalitetno rješenje za automatsku digitalnu klasifikaciju podataka. Dakako, performansa ovih digitalnih klasifikatora ovisila je uvelike o ulaznim parametrima, za što su u ovom slučaju odabrani boja, magnituda i veličina. Teorijski, a pokazalo se i u praksi, ovi parametri dobro su odgovarali standardnim postupcima morfološke klasifikacije galaksija. Nažalost, bili su previše dominantni u klasifikacijama neuobičajenih galaksija, poput spiralnih galaksija s velikim izbočinama, pri čemu rezultati digitalnih klasifikatora nisu bili niti blizu vizualnoj klasifikaciji od strane stručnjaka.

Mala grupa autora ovih automatskih klasifikatora (Lintott i ostali), pokrenula je projekt *Galaxy Zoo*⁴ s ciljem barem djelomičnog rasterećenja profesionalnih astronoma u području klasifikacije galaksija. Kako je početni skup podataka sadržavao otprilike milijun slika galaksija iz SDSS (*Sloan Digital Sky Survey*) pregleda neba, osnivači projekta pretpostavljali su odaziv građana u onoj mjeri koja bi bila dovoljna da se postojeće slike galaksija klasificiraju kroz nekoliko godina. Međutim, unutar 24 sata od pokretanja web stranice, odaziv građana bio je tako velik da su znanstvenici zaprimali 70 000 klasifikacija galaksija *po satu*. U prvih godinu dana 150 000 ljudi pristupilo je web stranici i klasificiralo galaksije, a unutar 365 dana ukupno je zaprimljeno 50 milijuna klasifikacija.

Početno su posjetitelji stranice trebali proći test koji nije zahtijevao veliko predznanje. Ubrzo nakon pristizanja na stranicu, posjetitelji su mogli pristupiti klasifikaciji galaksija. Zadatak koji se postavljao pred amatere bio je jednostavan, građani su vidjeli sliku galaksije te su trebali odrediti je li prikazana galaksija spiralna, eliptična ili prijelazna. Ovakav pristup, jednostavan test i malo potrebnog predznanja, svakako je utjecao na ovako

⁴ <http://zoo1.galaxyzoo.org/>

veliki broj pristupnika. Međutim, kako bi projekt bio od znanstvenog značaja, organizatori su morali paziti i na kvalitetu klasifikacija, što je na koncu riješeno vrlo jednostavnim principom. Svaka galaksija klasificirana je preko 80 puta, a konačni rezultat je konsenzus zaprimljenih odgovora. Konačni rezultati pokazali su da je kvaliteta klasifikacija galaksija u *Galaxy Zoo* projektu gotovo jednaka onima koje su izvršene od strane profesionalnih astronoma.

U međuvremenu je nastala druga verzija web stranice⁵, budući da je dio skupa podataka trebalo arhivirati kako bi se što kvalitetnije i brže analizirale nove slike galaksija. Novim dizajnom web stranice proširen je skup pitanja koji se postavlja korisnicima tijekom procesa klasifikacije, poput broja spiralnih krakova, veličine izbočina galaksija i slično. Uz novih 200 000 slika sjajnih galaksija prikupljenih SDSS istraživanjem, u *Galaxy Zoo 2* skupove podataka dodane su i slike Hubble teleskopa, te rezultati GEMS, GOODS, COSMOS i CANDLES pregleda. U roku od 14 mjeseci nakon lansiranja druge verzije *Galaxy Zoo* projekta zaprimljeno je preko 60 milijuna klasifikacija, a danas sudionici ovog projekta nastoje klasificirati i manje skupove galaksija, uključujući slike iz UKIDSS⁶ istraživanja (engl. *United Kingdom Infrared Deep Sky Survey*), najvećeg istraživanja dubokog svemira u infracrvenom dijelu elektromagnetskog spektra. Nadalje, jedan od najnovijih skupova podataka za klasifikaciju stiže s DECaLS istraživanja (engl. *Deep Energy Camery Legacy Survey*), koje generira slike slabije vidljivih galaksija. Uz klasifikaciju galaksija, na web stranici projekta moguće je vidjeti i sofisticirane računalne simulacije svemira, koje započinju od velikog praska, preko formiranja tamne tvari, plinova i zvijezda pa sve do simulacija današnjih galaksija.

2.2.2.1. *Galaxy Zoo: Mergers*

Galaxy Zoo: Mergers vjerojatno je najnapredniji pokušaj modeliranja podataka u amaterskoj astronomiji [1]. Java web aplikacijom, metodom simulacije međudjelovanja N-tijela, generirane su simulacije spojenih galaksija. Potom se korisniku aplikacije prikaže silueta slike spojene galaksije koja je stigla s teleskopa te se ponudi osam računalnih simulacija. Korisnik odabire redom simulacije koje najviše odgovaraju ponuđenoj silueti i rezultati se spremaju na zajednički server. Uz uspoređivanje silueta sa simulacijama,

⁵ <http://www.galaxyzoo.org>

⁶ <http://www.ukidss.org>

program je nudio mogućnost podešavanja raznih parametara pa su korisnici mogli prilagoditi računalne simulacije onako kako su vidjeli da najbolje odgovaraju prikazanoj slici, a svaki korisnik je mogao i ocijeniti vlastito zadovoljstvo aplikacijom i osobnim napretkom [2]. Ovaj projekt na koncu je rezultirao tisućama prilagođenih modela, zaprimljenih od strane građana, što je značajno doprinijelo kvaliteti računalnih simulacija i u drugim projektima.

2.2.2.2. *Galaxy Zoo forum*

Najpoznatiji rezultat *Galaxy Zoo* projekta je detekcija svjetlosne jeke veličine manje galaksije, a prvi put je ova aktivnost spomenuta na forumu projekta. Nazvano je „Hanny Voorwerp“ (prevedeno s nizozemskog: Hanny-in objekt), prema nizozemskoj učiteljici Hanny van Arkel koja je aktivnost detektirala. Daljnjim istraživanjima otkrilo se da je riječ o gašenju aktivne galaksijske jezgre (engl. *active galactic nucleus*, AGN) u susjednoj spiralnoj galaksiji IC 2497, koje je započelo prije otprilike 100 000 godina, što je inspiriralo sistematičnija istraživanja sličnih aktivnosti u drugim galaksijama. U istraživanjima su sudjelovali članovi foruma pod vodstvom Billa Keena, člana znanstvenog tima *Galaxy Zoo* projekta. Rezultati istraživanja su otkrića preko četrdeset oblaka ioniziranih AGN aktivnošću, od kojih trećina pokazuje sličnu brzinu opadanja AGN aktivnosti, na skalama od nekoliko desetaka tisuća godina [1].

Značajnije otkriće zajednice *Galaxy Zoo* volontera je i otkriće tzv. „zeleni grašak“ galaksija (engl. *green pea galaxies*), odnosno patuljastih galaksija s visokom frekvencijom formiranja zvijezda. Ove galaksije imenovala je Hanny van Arkel, a naziv su dobile zbog veličine i boje kojom su prikazane u SDSS slikama. Volonteri su uz identifikaciju proveli i sistematsko istraživanje ovih galaksija, prezentirali izvješća o zapažanjima, a koristili su i profesionalne SDSS alate za prikupljanje i analizu spektroskopskih podataka. Drugi projekti, poput sistematskih pretraživanja preklapajućih galaksija kako bi se odredio raspored prašine i zakoni prigušivanja svjetlosti, potaknuti su od strane profesionalnih znanstvenika *Galaxy Zoo* projekta, ali su istraživanja na kraju dobrovoljno preuzeli volonteri foruma, u suradnji s astronomom Keenom.

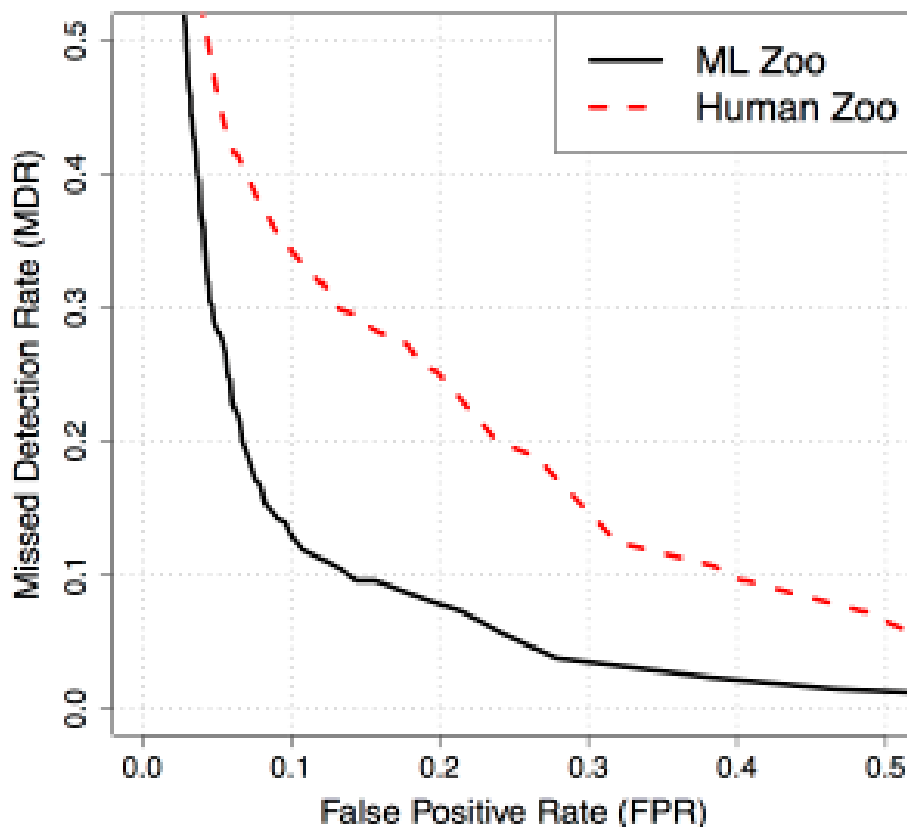
2.2.3. *Supernova Zoo*

S obzirom na veliki uspjeh *Galaxy Zoo* projekta, znanstvenici se nisu zaustavili samo na morfološkoj klasifikaciji galaksija, već je djelovanje projekta prošireno i na detekciju supernovi. *Supernova Zoo* projekt nastao je kao podrška unaprjeđenju *Palomar Transient Factory* računalnog klasifikatora. Naime, učinak ovog klasifikatora ovisio je o parametrima korištenim pri otkrivanju supernovi iz slika teleskopa pa su znanstvenici odlučili iskoristiti potencijal amatera astronoma. Tako su se amateri pretplatili na e-mail listu kako bi zaprimili automatsku obavijest o postavljanju nove slike potencijalne supernove na server. Po odgovoru na e-mail, pristupnici su dobili novu sliku, referentnu sliku te razliku između njih dvije, kao i skup pitanja. Nakon zaprimanja odgovora od volontera, kandidati za supernovu svrstani su u tri kategorije: „vjerojatno supernova“, „vjerojatno astrofizički objekt koji nije supernova“ i „nije astrofizički objekt“. Rezultati ispitivanja prikazani su na web stranici projekta, sa koje su ih preuzimali profesionalni znanstvenici za daljnja istraživanja. Iako je odaziv volontera bio brojčano manji nego u slučaju *Galaxy Zoo* projekta, rezultati sortiranja podataka pokazali su se izuzetno uspješnima, a konsenzus od svih odgovora postignut je otprilike unutar 15 minuta od slanja e-maila s obavijesti.

Zahvaljujući 25 000 klasifikacija *Supernova Zoo* volontera, Brink i ostali znanstvenici s *Palomar Transient Factory* projekta uspjeli su konstruirati učinkovit digitalni klasifikator supernovi, koji u gotovo stvarnom vremenu može procijeniti je li pojedini kandidat stvarna supernova ili ne. Ovaj klasifikator, nazvan „ML Zoo“ (engl. *Machine Learned Zoo*), započeo je s radom 2012. godine i od tada se konstantno unaprjeđuje. Istraživanje, provedeno na uzorku od 345 potvrđenih supernovi iz 2010. godine, pokazalo je da je ML Zoo učinkovitiji pri određivanju supernovi od volontera [2].

Na Slici 2.3 prikazan je graf ovisnosti pogrešnih pozitivnih odgovora (postotak supernova koje su klasificirane kao ne-supernove) u ovisnosti o broju promašenih detekcija supernova (postotak potvrđenih supernova koje su klasificirane kao ne-supernove). Na grafu su prikazani rezultati ML Zoo klasifikatora (puna crna linija) i rezultati klasifikacija od strane volontera (isprekidana crvena linija). Pokazalo se da je za svaku vrijednost pogrešnih pozitivnih odgovora ML Zoo klasifikator postigao manji broj promašenih detekcija.

Classification of known SNe



Slika 2.3 Broj promašenih detekcija supernovi u odnosu na broj pogrešnih potvrđenih detekcija. Prikazani rezultati odnose se na ML Zoo digitalni klasifikator i rezultate klasifikacija od strane volontera. Slika preuzeta s „Galaxy Zoo; A Zooniverse Project Blog“ web stranice [2].

2.2.4. Zooniverse projekt

Pregled svih projekata u fizici kojima su doprinijeli volonteri unutar okvira ovog rada bio bi nemoguć. Međutim, prethodno prezentirani najveći projekti ukazuju na uspješnu suradnju profesionalnih i amaterskih znanstvenika. Iako amateri nisu formalno obrazovani u pojedinim područjima fizike, ipak se mogu izdvojiti osnovne prednosti koje sudjelovanje volontera pruža znanosti. Prva prednost svakako je spremnost za doprinos slobodnog vremena istraživanjima u znanosti, potom fleksibilnost za sudjelovanje u različitim poljima fizike, neovisno o profitabilnosti pojedinih otkrića ili njihovo zanemarivanje u znanstvenim institucijama. Treća prednost svakako je mogućnost konstantnog promatranja nebeskih tijela i pojava, što može doprinijeti spoznajama koje prezaposleni znanstvenici zbog nedostatka vremena možda nikada ne bi otkrili.

Inspiriran *Galaxy Zoo* projektom i mogućnostima koje su se uvidjele sudjelovanjem volontera u znanstvenim procesima, kreiran je *Zooniverse* projekt. *Zooniverse*⁷ je danas najveća i najpopularnija platforma za volonterska istraživanja. Na jednom mjestu zainteresirani korisnici mogu vidjeti objave u znanstvenim časopisima čiji su autori ili suautori upravo volonteri, sudjelovati u raspravama o znanstvenim pojavama i istraživanjima na forumima i ono najbitnije, pristupiti projektima. Projekti koji su na raspolaganju dolaze iz svih grana znanosti, a neki od projekata u koje se volonteri mogu uključiti su morfološka klasifikacija galaksija (*Galaxy Zoo*), otkrivanje planeta (*Planet Hunters*), istraživanje dna oceana (*Seafloor Explorer*), istraživanje planktona (*Plankton Portal*), potraga za diskovima kozmičke prašine (*Disk Detective*) i mnogi drugi.

⁷ <https://www.zooniverse.org/>

3. Diskovi kozmičke prašine

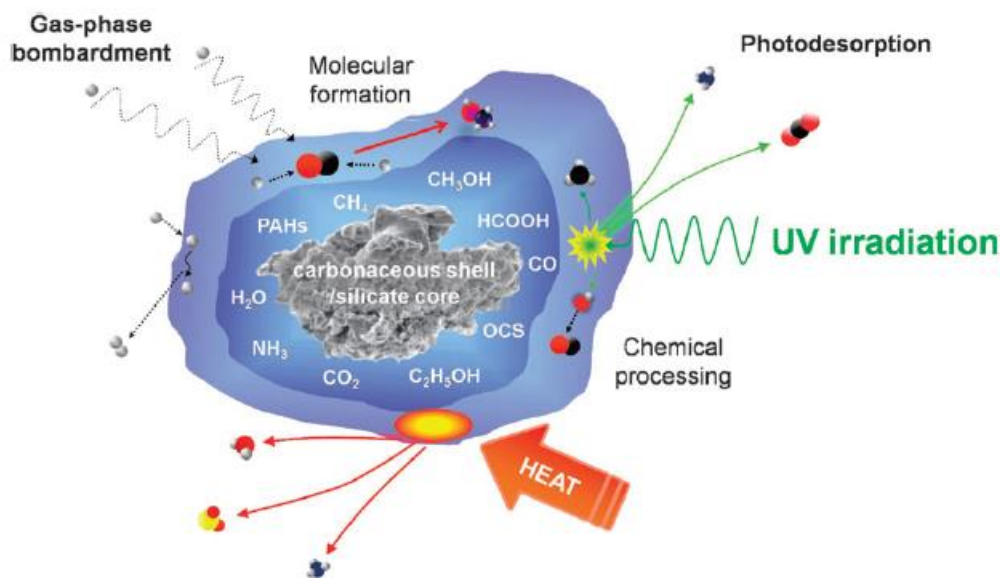
Astronome je oduvijek zanimalo tajnoviti slabi sjaj koji se na različitim mjestima u svemiru pojavljivao u nejednakim intervalima. Jedan takav primjer je tzv. zodijska svjetlost, tanki snop svjetlosti kojeg se najbolje moglo primijetiti duž ekliptike prije zalaska sunca u proljeće ili izlaska sunca u jesen. Tek nedavno je utvrđeno da se ovaj sjaj pojavljuje jer se sunčeva svjetlost odbija od sitnih zrnaca kozmičke prašine.

3.1. *Kozmička prašina*

Ponekim astronomima kozmička prašina ponajprije je bila velika smetnja, primjerice prilikom analize boja udaljenih kvazara. U tim slučajevima, raspršenje svjetlosti od čestice kozmičke prašine stvara smetnje u mjerenjima te utječe na rezultate istraživanja pa je frustracija ovih astronoma u potpunosti razumljiva. Naknadno su znanstvenici uvidjeli količinu i značaj informacija koje se mogu dobiti istraživanjima čestica kozmičke prašine, a posebice nakon pregleda neba u infracrvenom dijelu elektromagnetskog spektra.

Kozmička prašina najčešće se sastoji od kristalnog (grafit i dijamant) te amornog ugljika, ugljikovih spojeva, oksida i to najviše od silikata. Na površinama kozmičke prašine mogu se adsorbirati atomi i molekule te ona u tom slučaju služi kao katalizator za reakcije stvaranja molekula [3]. Veličine čestica variraju od nekoliko nanometra pa sve do malih krutih zrnaca reda veličine 10 μm . Grafitna ili silikatna zrnca kozmičke prašine često su prekrivena astrofizičkim ledom. Procesi nastanka i razvoja astrofizičkog leda na zrcu kozmičke prašine prikazani su na Slici 3.1. Na izuzetno niskim temperaturama, manjima od 20 K, u područjima visoke koncentracije vodikovih atoma, hidrogenizacijom se stvaraju molekule poput H_2O , NH_3 , CH_3OH i CH_4 , a led koji se sastoji od ovih molekula često se zove polarni led, budući da njime većinom dominiraju molekule vode. U područjima gdje koncentracija vodika nije visoka, površinski vezani atomi ugljika, dušika i kisika stvaraju takozvani apolarni led koji se sastoji od CO , CO_2 , N_2 i O_2 spojeva i molekula [4]. Ako led na površini zrnca prašine preživi ultraljubičasto, X i kozmičko zračenje kojima potencijalno biva izložen, zajedno sa zrcem kozmičke prašine može stići do površina planeta. Prema tome, zrnca kozmičke prašine ne otkrivaju samo informacije o postanku planeta, zvijezda i

galaksija, već mogu dovesti do odgovora na pitanja o porijeklu i eventualnom postojanju vode na planetima unutar i izvan Sunčevog sustava.



Slika 3.1 Procesi nastanka i razvoja polarnog i apolarnog leda na površini zrnca kozmičke prašine [4].

Prvi astronom koji je prepoznao kozmičku prašinu u međuplanetarnom prostoru, ali i u blizini Sunca, bio je gospodin Giovanni Cassini, još u 17. stoljeću [5]. Iako su 1830.-ih započela istraživanja astronomskih objekata u infracrvenom dijelu elektromagnetskog spektra, tek su razvojem radio astronomije i počecima tzv. moderne astronomije započela i detaljna istraživanja kozmičke prašine, šezdesetih godina prošlog stoljeća. Potom su se desetljećima istraživanja kozmičke prašine svodila na istraživanja i analizu zračenja objekata i raspršivanja zračenja od zrnca kozmičke prašine. Potom je 2004. godine NASA lansirala svemirsku letjelicu *Cassini*, koja uz brojne detektore sadrži i analizator kozmičke prašine - CDA (engl. *Cosmic Dust Analyzer*).

CDA omogućuje izravan kontakt čestica prašine s površinom kolektora te na osnovu sudara i oblaka plazme, kojeg čestice ostavljaju iza sebe kad ispare, analizator izvlači podatke o brzini, veličini i kemijskom sastavu čestice. CDA je fantastičan analizator jer uz analizu svojstava čestice može odrediti i orbitu čestice prije udara [5]. Podaci o strukturi i orbitama čestica kozmičke prašine omogućuju izračune koji vode do podataka o porijeklu čestice, tvarima koje sačinjavaju nebeska tijela od kojih su nastale detektirane čestice, ali i o sastavu medija kroz kojeg je čestica putovala. Budući da je kozmičku prašinu moguće naći u gotovo svim dijelovima Svemira, detekcijom i analizom njezinih čestica moguće je saznati

izuzetno mnogo, kako o našoj galaksiji, tako i o dubokom Svemiru. Kozmička prašina često se, prema astronomskoj lokaciji, dijeli na međugalaktičku, međuzvjezdanu, međuplanetarnu prašinu i prašinu koja se nalazi u blizini planeta i zvijezda. Primjerice, na Slici 3.2 prikazana je kozmička prašina unutar galaksije Andromeda, slikana 24-mikronskim detektorom NASA-inog *Spitzer* svemirskog teleskopa.



Slika 3.2 Kozmička prašina unutar galaksije Andromeda, slikana u infracrvenom dijelu EM spektra. Slika je preuzeta sa službene stranice NASA Spitzer svemirskog teleskopa (www.spitzer.caltech.edu).

Kozmička prašina složena je po sastavu, ali i dinamici kretanja. Izvori kozmičke prašine koja se nalazi u međuplanetarnom prostoru i u blizini planeta mogu biti kometi, asteroidi ili objekti iz Kuiperova oblaka [6]. Većina informacija o sastavu međuplanetarne prašine dobivena je analizom mineralogije i mjerenjem gustoće meteora, prikupljenih većinom u gornjem dijelu Zemljine atmosfere. Međuplanetarnu prašinu znanstvenici pronalaze i na dnu oceana, a neke od drugih metoda mjerenja su mjerenje termalne emisije, optičkog raspršenja i radarske jeke senzorima ili pak tzv. „in-situ“ metoda, tj. detekcija i sakupljanje čestica na „licu mjesta“, u Svemiru.

Puno informacija može se dobiti i analizom dinamike čestica kozmičke prašine. Primjerice, općenito se smatra da prašina s kometa ima jaku inklinaciju i ekscentricitet orbite, dok je orbita čestica čiji su izvori asteroidi pravilnija, odnosno više nalikuje kružnoj putanji. Uz podatke o sastavu izvora iz kojeg je potekla čestica, svojstva orbite čestice kozmičke prašine mogu dati informacije i o mediju kroz koji je čestica prošla. Primjerice, kada je glavna os orbite manja od prosječne, čestica je najvjerojatnije prošla kroz unutarnji Sunčev sustav jer ovakve deformacije orbite često uzrokuju solarni vjetrovi. Prolaskom kroz prostor, čestica može promijeniti putanju pod utjecajem radijacijskih sila, perturbacijama planeta, međučestičnim sudarima, raspršivanjem, isparavanjem i ostalim dinamičkim procesima i silama. Istraživanje sastava, reprodukcija putanje te određivanje procesa razvoja čestica prašine zahtjeva detaljna dinamička modeliranja, ali zato pruža neizmjerljivo vrijedne

informacije ne samo o sastavu, podrijetlu i evoluciji izvora već i o lokaciji i sastavu prostora oko izvora kozmičke prašine.

3.2. *Nastanak planeta*

Postoji nekoliko teorija o nastanku planeta, ali do sada je najviše prihvaćena tzv. „nebularna hipoteza“. Prema ovoj hipotezi, nastanak planeta nemoguće je razjasniti bez da se prije toga ne dotakne procesa nastanka zvijezda. Nastanak zvijezda i planeta neodvojiv je, a fizička veza upravo su diskovi kozmičke prašine.

Iako je proces nastanka zvijezda daleko od stupnja potpune razjašnjenosti, ipak je postignuto slaganje oko nekoliko stadija nastanka zvijezda. Vjeruje se da je proces razvoja zvijezde moguće podijeliti u četiri stadija. U prvom koraku, iz tzv. divovskih molekularnih oblaka, sastavljenih većinom od vodika, stvaraju se gusti fragmenti iz kojih se potom jakim gravitacijskim silama stvaraju guste jezgre, protozvjezdane nebule. Ako je masa protozvjezdane nebule približna masi Sunca, ona će se urušavati približno 100 000 godina, a tijekom urušavanja se zbog brze kompresije stvara vruća hidrostatična jezgra čija je masa samo mali dio mase početne nebule. Kako nebula postaje gušća, tako se nasumična gibanja čestica plina iz početnog molekularnog oblaka sve više poravnavaju sa smjerom ukupnog zakretnog momenta nebule. Zbog očuvanja zakretnog momenta, rotacija ovih čestica plina se povećava kako se radijus nebule urušavanjem smanjuje pa se plin širi od središta zvijezde prema van. Ovim procesom stvara se nakupina materije oko zvijezde, sastavljena od čestica plina i prašine, a koja se naziva *cirkumzvjezdani disk*. Jezgra postupno dobiva na masi dok ne postane mlada protozvijezda. U prvom stadiju protozvijezda i njen disk u spektralnoj klasifikaciji nalaze se u klasi 0 i obavijeni su gustim omotačem sastavljenim od plina i prašine. Ovaj omotač toliko je gust da je protozvijezdu i njezin cirkumzvjezdani disk moguće vidjeti samo promatranjem na milimetarskim valnim duljinama te valnim duljinama koje su daleko u infracrvenom dijelu spektra [7] .

Kako se nakupljanje materijala s omotača na disk nastavlja, protozvijezda i njezin cirkumzvjezdani disk postaju više uočljivi, početno u daleko-infracrvenom dijelu spektra, a kasnije i u vidljivom dijelu. Objekti u ovoj fazi spektralno su svrstani u klasu 1, a zovu se još i *mlade T Tauri* zvijezde, razvijene protozvijezde ili mladi zvjezdani objekti (engl. *Young Stellar Objects*). Tijekom druge faze, protozvijezda počinje s fuzijom deuterija, a ako masa

protozvijezde prelazi 80 Jupiterovih masa, počinje fuzija vodika. U suprotnom će protozvijezda postati smeđi patuljak.

Tijekom treće faze, zvijezda prikuplja od 10^{-7} do 10^{-9} masa Sunca po godini, a posjeduje i ostale karakteristike *klasične T Tauri zvijezde*: magnetsku aktivnost, snažan tok emisijskih linija koje se stvaraju oko magnetskih polova kada plin nakupljen s diska udari na površinu zvijezde, fotometrijsku varijabilnost, a sustav povremeno izbacuje i bipolarne mlazove. Posljedice nakupljanja materijala su upravo mlazovi koji izbacivanjem sa zvijezde nose sa sobom i dio zakretnog momenta pa smanjuju masu diska, što pak ne prelazi 3% ukupne mase zvijezde. Zvijezda ulazi u fazu klasične T Tauri zvijezde otprilike milijun godina nakon početka kolabiranja molekularnog oblaka, a u trećoj fazi se zadržava približno 10 milijuna godina.

Na koncu, tijekom četvrte faze razvoja zvijezde, cirkumzvezdani disk nestane zbog nakupljanja čestica na zvijezdu, nastanka planeta, izbacivanja mlazova i foto-isparavanja, čiji su pak uzrok UV zračenja od središnje zvijezde i susjednih zvijezda. Kao rezultat, mlada zvijezda postaje tzv. *slabo povezana T Tauri zvijezda* koja se postupno, tijekom stotina milijuna godina, razvije u zvijezdu nalik Suncu.

3.2.1. Protoplanetarni diskovi

Smatra se da razvoj planeta započinje tijekom treće faze razvoja zvijezde, kada se iz ogromnog spremnika plina i prašine u disku stvaraju divovski plinoviti planeti [7]. Zbog mogućnosti razvoja planetarnog sustava, ovi diskovi se nazivaju protoplanetarni diskovi.

Opažanja i mjerenja mase, radijusa, strukture, sastava i vremena života protoplanetarnih diskova uvelike su doprinijela shvaćanju procesa evolucije diska. Shvaćanje razvoja protoplanetarnih diskova važno je i za razumijevanje nastanka planeta. Procesi poput viskoznog nagomilavanja, nakupljanja i koagulacije čestica prašine, dinamičkih interakcija s drugim tijelima u okolini zvijezde, kao i foto-evaporacija ultraljubičastim i rendgenskim zračenjem utječu na razvoj protoplanetarnih diskova pa ih je bitno razumjeti kako bi se moglo bolje razjasniti nastajanje planeta.

Prvi model koji je nastojao objasniti evoluciju protoplanetarnih diskova je tzv. viskozni prijenos. Prema ovom modelu, zvijezda nagomilava materijal s unutarnje strane

diska, dok materijal s vanjskog omotača pada na vanjske dijelove diska. Nakon ulaska u protoplanetarnu fazu, omotač u potpunosti nestaje, preostali materijal iz diska se nagomilava na zvijezdu te nakon nekoliko milijuna godina disk u potpunosti nestaje. Akrecija diska na zvijezdu promatrala se dugi period godina i ovaj dio modela u dobrom je slaganju s opažanjima. Međutim, modeli viskozne evolucije pretpostavljaju glatki, gotovo linearni razvoj svojstava diska s vremenom [8]. Kako su se u međuvremenu opazile pojave u diskovima koje su u neslaganju s modelom, poput brzog nestajanja diska nakon dužeg perioda i tzv. prijelaznih diskova, zaključeno je da su modeli viskozne evolucije protoplanetarnih sustava aproksimacija prvog reda gubitka mase diska. Uz viskozno nagomilavanje materijala s unutarnjeg dijela diska na zvijezdu, drugi važan uzrok gubitka mase diska svakako su i fotoni koji pristižu sa središnje zvijezde, ali i susjednih zvijezda. Ovi fotoni, koji mogu biti u energetsom rasponu od 6 eV do čak 0.1 keV, uzrokuju isparavanje plina u disku.

U početnim fazama protoplanetarnog diska, otprilike 99 % diska čine plinovi [8], dok preostalih 1% čine čestice krutih tvari. Viskozni prijenos tvari diska i foto–isparavanje utječu na gibanje plina, zajedno s kojim se gibaju i čestice tvari čiji je radijus manji od 0.1 μm . Tijekom gibanja, čestice se sudaraju i nastavljaju gibati zajedno, smanjuje im se masa po jedinici površine pa se čestice krutih tvari polako odvajaju od plina. Iznosi privlačnih sila koje djeluju na sve veće čestice se povećavaju pa se čestice počinju smještati u središnjem dijelu diska. Naravno, ovi procesi povećavaju gustoću unutarnjeg dijela diska, ubrzava se rast čestica prašine, što na kraju rezultira gibanjem najvećih čestica prašine prema sredini diska. Kada bi ovaj proces bio idealan, bez iznenadnih turbulencija diska, konačni rezultat bio bi savršeno slojeviti disk s manjim česticama prašine na površini diska, a velikim česticama u središnjoj ravnini diska [8].

Međutim, u prirodi ne postoji proces koji u sebi ne sadrži barem najmanji postotak odstupanja od idealnog modela, a kako su diskovi kozmičke prašine izuzetno burni sustavi, u istraživanju koagulacije čestica prašine, kojeg su Dullemond & Dominik započeli 2005., u obzir su uzeti nimalo idealni procesi taloženja i miješanja čestica prašine. Zaključak istraživanja je bio da kombinacija Brownovog gibanja, diferencijalnog taloženja i turbulencije može otkloniti sve čestice radijusa manjeg od 100 μm iz diska, u periodu manjem od 10^4 godina. Kako su astronomskim opažanjima i nakon ovog perioda u protoplanetarnim diskovima pronađene čestice veličine mikrona, 2008. donesen je zaključak

da opstanak čestica kozmičke prašine ovisi o složenoj ravnoteži između koagulacije i fragmentacije čestica [8].

Iako su i drugi, realističniji modeli, zaključili da sveprisutnost čestica prašine u diskovima ovisi i o fragmentaciji čestica, niti ovi modeli nisu uspjeli razriješiti jedan od većih kamena spoticanja u teorijama razvoja planeta, tzv. metarsku barijeru. Naime, kako čestice rastu, tako im se povećava i brzina. Kada dosegnu veličinu od 1 m, čestice dosegnu maksimalnu brzinu približnog iznosa 100 m/s. Većina istraživanja opazila je da se na ovoj veličini čestice brzo približe zvijezdi i ispare ili se pak sudare s drugim česticama približno iste veličine, što na tako velikim brzinama u većini slučajeva uzrokuje raspadanje čestice. Pojedina istraživanja nastojala su objasniti ovaj problem pomoću stvaranja planetezimala u dugovječnim vrtlozima ili pak gravitacijske nestabilnosti milimetarskih sferoidnih minerala (engl. *chondrules*) [8]. S druge strane, postoje istraživanja mogućnosti rasta čestica preko veličine od 1 m nakon sudara, a koja se baziraju na početnim otkrićima da čestice veličine nekoliko centimetara mogu preživjeti u sudarima s česticama slične veličine, u okruženju guste raspodjele čestica prašine, bez obzira što im se brzina smatra prevelikom za daljnji rast [9]. Ukupno gledano, postoji veliki broj međusobno različitih teorija koje nastoje prevladati ovu barijeru, ali još uvijek se nije pronašao model koji bi u potpunosti objasnio kako čestice veličine jednog metra preživljavaju sudare i dosežu veličinu od približno jednog kilometra. Relativno je dobro prihvaćena hipoteza, koju su opravdala i brojna opažanja, a koja tvrdi da se čestice na veličini od jednog kilometra počinju gravitacijski privlačiti i tvoriti planetezimale, iz kojih će se kasnije formirati planeti. Točni uzroci i procesi formiranja planetezimala još uvijek su nepoznati.

Sa smanjenjem mase diska, proces foto-isparavanja postaje sve važniji za gibanje čestica. Kada brzina nagomilavanja čestica s diska na zvijezdu postane približno jednaka isparavanju fotona koji pristižu sa zvijezde na disk, vanjski dio diska više nije u mogućnosti opskrbljivati unutarnji dio diska tvarima [8]. Unutarnji disk počinje nestajati, a sam proces nestajanja unutarnjeg diska traje otprilike 10^5 godina. Kako nestaje onaj dio diska bliže zvijezdi, tako se između unutarnje i vanjske strane diska počinju stvarati procjepi, nazvani još i „mrtve zone“, čiji je promjer približno nekoliko AJ. Nakon stvaranja procjepa, fotoni koji stižu sa zvijezde udaraju o unutarnji rub vanjskog dijela diska, čime sprječavaju prolazak materijala s vanjskog dijela diska u procjep. Dakako, kako materijal iz vanjskog diska više ne može proći prema zvijezdi, brzina nagomilavanja materijala s diska na zvijezdu opada pa zvijezda počinje izlaziti iz klasične T-Tauri faze i ulazi u tzv. *slabo povezanu T-*

Tauri fazu. Stvaranje procjepa u disku označava kraj faze „iscrpljivanja mase“ i početak faze „rasipanja diska“ [8] .

Jedan od većih problema koji se pojavljuju u pokušajima razvijanja teorija o nastanku planeta upravo je faza rasipanja diska, odnosno nisu do kraja jasni procesi kojima protoplanetarni disk bogat plinom i česticama međuzvjezdane prašine postaje tzv. *debris disk*, disk osiromašen plinom koji sadrži produkte sudara protoplanetarnih i asteroidnih tijela [7] . Trenutna opažanja pokazuju da mikronske čestice prašine nestaju iz unutarnjeg dijela protoplanetarnog diska u periodu od 1 do 10 milijuna godina, dok čak kod polovice zvijezda sličnih Suncu čestice iz unutarnjeg dijela diska nestanu unutar 3 milijuna godina. Još jedno od otvorenih pitanja je uzrok nestanka, tj. nestaju li čestice zbog privlačenja od zvijezde ili zbog nakupljanja u veće komade. Sve u svemu, pretpostavlja se da su vremenske skale nestajanja unutarnjeg dijela protoplanetarnog diska povezane s vremenskom skalom u kojoj nastaju planeti i glavno pitanje je kako ova dva procesa utječu jedan na drugog. Jasno je da se proces nastanka planetezimala te iz njih i protoplaneta mora dogoditi prije nestanka unutarnjeg dijela protoplanetarnog diska. Vrijedi postaviti i obratno pitanje: uzrokuje li stvaranje velikih planeta nestanak unutarnjeg dijela diska? Kada nastane divovski planet, on procesom nagomilavanja plina i gravitacijskim privlačenjem efektivno može stvoriti procjepe između unutarnjeg i vanjskog dijela diska. Analiza izotopa elemenata iz kojih su sačinjeni kometi pokazuje da su tijela iz kojih su potekli nastala u prvih nekoliko milijuna godina od nastanka zvijezde [7]. Mjerenjima se pokazalo da kod većine diskova nestajanje kozmičke prašine iz unutarnjeg dijela znači i nestajanje plina. S druge strane, prihvaćena je teorija da se divovski planeti koji orbitiraju na udaljenosti između 3 i 10 AJ, veličine približne Jupiterovoj, formiraju unutar 10 milijuna godina od nastanka cirkumzvjezdanog diska, što je u slaganju s vremenskom skalom raspadanja unutarnjeg dijela diska pa ovo slaganje podupire teoriju da unutarnji dio diska nestaje pod utjecajem stvaranja divovskih plinovitih planeta. Ova opažanja potvrdilo je i istraživanje znanstvenika koji su okupljeni u FEPS programu. Oni su analizirali rezultate snimanja 74 mlade zvijezde starosti između 3 i 10 milijuna godina, a masa između 0.8 i 1.2 masa Sunca. Analizirani su rezultati mjerenja infracrvenom kamerom *Spitzer* svemirskog teleskopa (engl. *Infrared Array Camera*) i snimke 2MASS (engl. *Two-Mass All Sky Survey*) pregleda. Zaključeno je da izuzetno brzo raspadanje unutarnjeg diska postoji, ali da vremenski period u kojem se raspršenje diska događa varira od sustava do sustava. Znanstvenici su predložili i istraživanje prisustva plina u osiromašenom unutarnjem disku, nakon što nestanu sve manje čestice. Time bi se

razjasnilo uzrokuje li pojavu procjepa koagulacija i nagomilavanje manjih čestica u unutarnjem pojasu, ili procjep uzrokuje divovski plinoviti planet u vanjskom dijelu diska, nakon čega se materijal iz unutarnjeg dijela troši propadanjem na zvijezdu. Naime, ako se detektira plin, vjerojatniji je slučaj stvaranja procjepa nakupljanjem čestica prašine jer u tom slučaju zvijezda ne privlači sve tvari iz unutarnjeg diska. Ako se plin u unutarnjem disku ne detektira, to bi značilo da su sve čestice plina nakupljene na divovskim plinovitim planetima, čak i prije stvaranja procjepa [7]. Istraživanja postojanja plina u unutarnjem disku još uvijek traju.

3.2.2. Stjenoviti planeti

Istraživanja i opažanja dovela su do zaključka da se planeti slični Zemlji (tj. stjenoviti planeti) stvaraju u unutarnjem pojasu protoplanetarnog diska. Stjenoviti planeti formiraju se u periodu od 10 do 100 milijuna godina, na udaljenosti od 0.5 do 4 AJ od zvijezde [10]. Rezonantna međudjelovanja koja su posljedica utjecaja divovskih planeta iz vanjskog dijela diska, ali i nestabilnosti samog unutarnjeg diska u kojem se nalaze, utječu na proces stvaranja stjenovitih planeta.

Općenito se smatra da se razvoj stjenovitih planeta može podijeliti u četiri faze: sedimentacija i rast prašine, rast planetezimala, rast planetarnih embrija i rast planeta. Posljednja istraživanja pokazala su da je mala vjerojatnost da se ovi procesi događaju prostorno blizu jedan drugoga, ali da je vjerojatnije da se pojedine faze događaju istovremeno na različitim udaljenostima od zvijezde, budući da se orbitalni period, površinska gustoća krutih tijela, gustoća plinova, viskoznost i temperatura jako mijenjaju s promjenom udaljenosti od osi, kao i s vremenom [11].

Ukoliko planetezimali uspiju narasti dovoljno, gravitacijsko fokusiranje počinje dobivati na značaju. Pokazalo se da je povećanje udarnog presjeka sudara nastalih gravitacijskim fokusiranjem proporcionalno kvadratu omjera orbitalne u odnosu na relativnu brzinu kretanja planetezimala. Kako dinamičko trenje smanjuje relativne brzine najvećih dijelova, u odnosu na ostale, a ta tijela ionako već imaju najveće orbitalne brzine, rast planetezimala se transformira u tzv. proces rasta „bježanjem“, odnosno najveća tijela imaju najveće udarne presjeke binarnih sudara pa prema tome rastu najbrže te postaju planetarni embriji. Dok privlačenje od strane plina ima manje utjecaja na veća tijela, dinamičko trenje

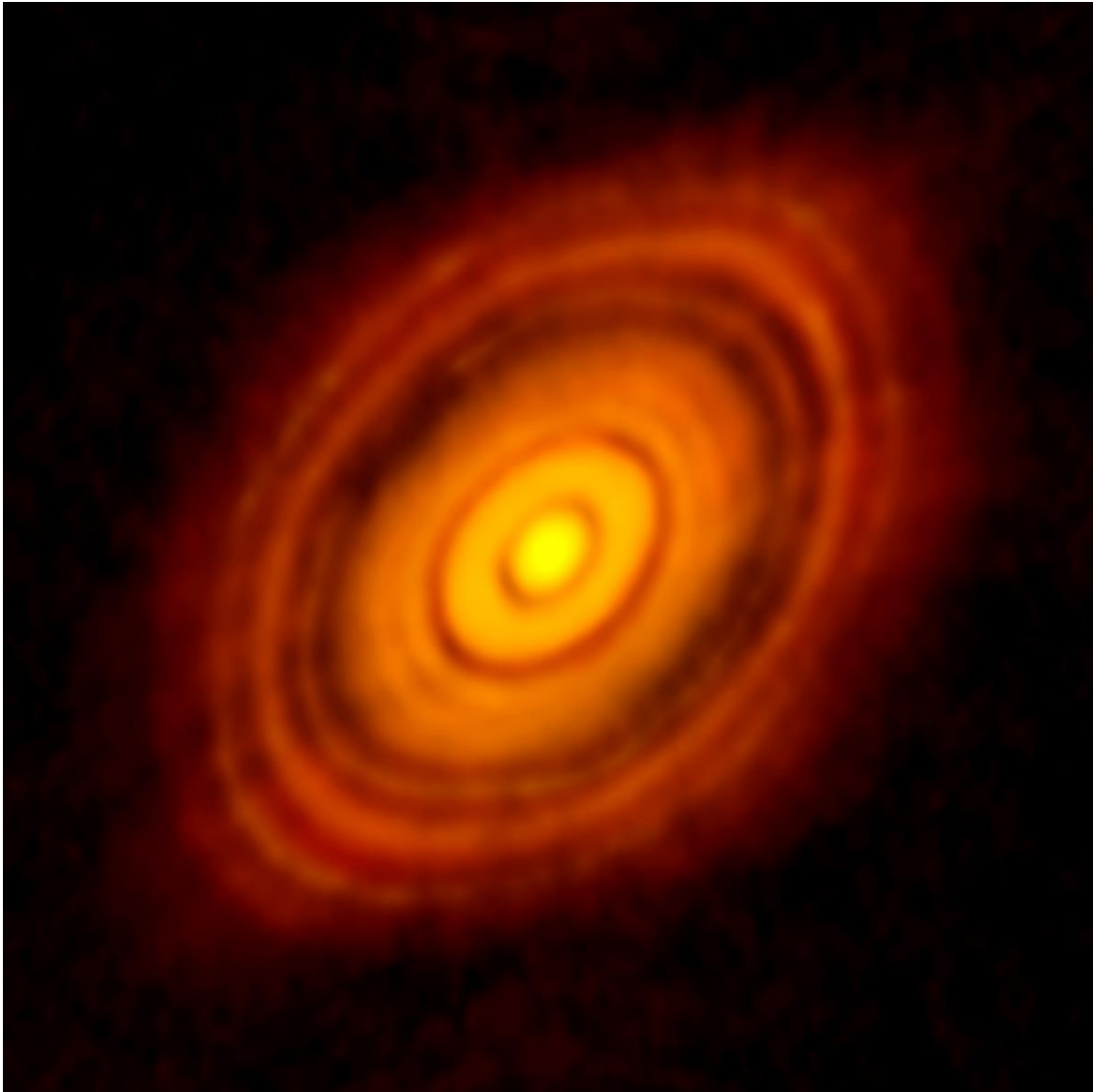
efikasno prenosi energiju s većih na manja tijela, koja međudjeluju jače s okolnim plinom. Dinamičko trenje prigušuje ekscentricitet i inklinaciju većih tijela, nastalih gravitacijskim međudjelovanjem s velikim brojem malih tijela. Manja tijela vjerojatnije će se raspasti nego rasti, zbog većih relativnih brzina i manjih gravitacijskih energija koje bi ih spojile, što dalje povećava broj još manjih tijela, efikasnost dinamičkog trenja i privlačenja od plina.

Rast „bježanjem“ stvara bimodalnu raspodjelu masa u disku sastavljenom od planetarnih embrija i planetezimala. Stvaranje planetarnih embrija je samo-limitirajuće i usporava rast „bježanjem“ i to viskoznim miješanjem susjedne populacije planetezimala, čime se povećavaju njihove brzine kretanja pa se rast dodatno usporava, a brzina rasta susjednih embrija sve se više izjednačava. Ovaj stadij rasta naziva se „oligarhijski“ rast i on održava bimodalnu raspodjelu masa planetarnih embrija. U ovoj fazi, masa pojedinačnog embrija otprilike je 100 puta veća od mase prosječnog planetezimala. Konačna masa oligarha ovisi o udaljenosti od zvijezde i površinskoj gustoći planetezimala, a naziva se izolacijska masa. Za stjenovite planete iznosi 0.1 mase Zemlje. Konačni rezultat oligarh faze je formacija otprilike 100 planetarnih embrija veličine između Mjeseca i Marsa. Smatra se da se nalaze unutar rascjepa u disku i da su odvojeni prstenima koje sačinjavaju preostali planetezimali. Pretpostavlja se da ova faza traje nekoliko stotina tisuća godina.

Do sada najpreciznija slika nastajanja planeta je slika mlade HL Tau zvijezde s protoplanetarnim diskom, snimljena ALMA (engl. *Atacama Large Millimeter-submillimeter Array*) teleskopima (Slika 3.3). Na slici su jasno vidljivi višestruki procjepi, koji sugeriraju da je nastanak planeta već u poodmakloj fazi pa su se unutar diska vjerojatno već stvorili planetezimali, možda čak i deseci planetarnih embrija.

Oligarhijski rast završava kada energija koja se prenosi dinamičkim trenjem ne može više održavati kružna gibanja planetarnih embrija. Tipično se ovo događa kada disk postane previše osiromašen planetezimalima, nakon nagomilavanja većine planetezimala na planete, zvijezde ili se pak dio planetezimala rasprši izvan cirkumzvezdanog diska. Bez dinamičkog trenja, planetarni embriji počinju ukrštavati orbite, što uzrokuje sudare embrija, čiji rezultat su spajanja u veća tijela ili raspršenja. Populacija planetezimala stabilno opada tijekom ove faze, sve dok nije preostalo samo nekoliko planetezimala na polu-stabilnim orbitama. Ovi veliki udari posljednji su u fazi stvaranja stjenovitih planeta. Kada preostali planetarni embriji pronađu stabilne orbite i prestanu nagomilavati okolni materijal, mogu se nazivati

planetima. Simulacije pokazuju da ovim procesima, koji traju od 10 do 100 milijuna godina, nastaje otprilike 2 do 5 planeta u sustavu zvijezde koja je slična Suncu.



Slika 3.3 HL Tau zvijezda i protoplanetarni disk. Slika je snimljena ALMA teleskopom i trenutno je najpreciznija slika nastajanja planeta oko mlade zvijezde. Slika je preuzeta sa službene stranice ALMA opservatorija (<http://www.almaobservatory.org>).

3.2.3. Divovski planeti

Nastanak i razvoj divovskih planeta još uvijek nisu do kraja objašnjeni jedinstvenom teorijom. Kako je razmatranjima nastanka planeta primijećen utjecaj divovskih planeta na orbite i proces razvoja stjenovitih planeta u unutarnjem dijelu diska, smatra se da divovski planeti nastaju unutar 10 milijuna godina od nastanka cirkumzvezdanog diska. Kako u ovom vremenskom razdoblju masa krutih čestica u unutarnjem dijelu protoplanetarnog diska nije

dovoljna za stvaranje divovskih planeta, jezgre divovskih planeta nastaju u vanjskom rubu planetarnog diska, na udaljenosti od minimalno nekoliko AJ do otprilike nekoliko desetaka AJ [10].

Iako su istraživanja divovskih planeta započela još s istraživanjima Jupitera, Saturna i ostalih jovijanskih planeta, otkrića divovskih planeta izvan Sunčevog sustava dovela su do eksplozije teorija o postanku ove vrste planeta. Do sada su se istaknule dvije teorije koje objašnjavaju dobar dio pojedinosti nastanka divovskih planeta pa ću u nastavku ukratko navesti opće teze, prednosti, kao i neslaganja ovih dvaju teorija s opažanjima i rezultatima istraživanja.

Standardni model, koji je postojao i prije otkrića divovskih planeta izvan Sunčeva sustava, naziva se model „nagomilavanja jezgre“. Prema ovom modelu, početni koraci stvaranja jezgara divovskih planeta jednaki su kao i kod stjenovitih planeta, do trenutka kreiranja planetarnih embrija. Planetezimali se potom, po ovoj teoriji, nagomilavaju na embrije, na koncu čega se stvara jezgra divovskog planeta, načinjena od teških elemenata. Jednom kada jezgra dosegne masu nekoliko puta veću od mase Zemlje i kada orbitalna brzina jezgre premaši brzinu gibanja plina u disku, jezgra planeta počinje privlačiti plin iz okolnog diska. Nakon toga se čestice krutih tvari i plina istovremeno nagomilavaju na jezgru. Kada masa nakupljenog plina dosegne masu jezgre, ako je brzina nakupljanja plina dovoljno velika, može se stvoriti planet mase približne masi Jupitera. Nagomilavanje tvari prestaje kada se u blizini planeta stvori procjep ili kada se protoplanetarni disk u potpunosti rasprši. Potom dolazi do kontrakcije i hlađenja jezgre i omotača, planet postaje stabilan i ne mijenja masu.

Prednost modela nagomilavanja jezgre svakako je široka primjenjivost, odnosno uz stvaranje divovskih planeta, ovaj model može objasniti i stvaranje ledenih planeta, vezu između svojstava metala u zvijezdi i planetima, kao i odnos metala u zvijezdi s učestalošću divovskih planeta. Model predviđa da je pojava divovskih planeta u blizini zvijezda s masom manjom od sunčeve rijetka, što se do sada pokazalo istinitim. Neke od mana modela su ovisnost o procesima stvaranja planetezimala i ranih planetarnih embrija, koji još uvijek nisu razjašnjeni. Također, model ne može objasniti postojanje divovskih planeta u blizini zvijezda s jako malim postotkom teških metala ili na udaljenostima većima od 20 AJ [12].

Drugi model zasniva se na gravitacijskoj nestabilnosti samog protoplanetarnog diska, koja uzrokuje fragmentaciju diska u male nakupine iz kojih se potom stvaraju jezgre planeta.

Iako je model nestabilnosti diska vjerojatno i stariji od modela nakupljanja jezgre, spori razvoj teorije ponajprije uzrokuje istraživanje uvjeta u kojima bi moglo doći do fragmentacije diska. Prema tome, većina nedostataka ovog modela veže se upravo za nedovoljno razumijevanje modela, poput točnih uvjeta koji mogu uzrokovati fragmentaciju diska, mogućnosti razvoja fragmenata diska u gravitacijski čvrsto povezane planete, a znanstvenici ovim modelom još uvijek ne mogu objasniti vezu između pojave divovskih planeta i metalnih svojstava zvijezde. Osnovni uvjeti za razvoj divovskih planeta u ovom modelu su velike nakupine mase u određenim dijelovima diska (kako bi se mogle javiti gravitacijske nestabilnosti u disku) te značajno hlađenje diska kako bi se povećala vjerojatnost fragmentacije spiralnih struktura. Glavna prednost mehanizma je raznolikost mogućih ishoda nakon fragmentacije diska, budući da bi fragmenti mogli formirati plinovite divove sa i bez jezgre, plinovite divove s različitom koncentracijom metala, smeđe patuljke, čak i stjenovite planete. Također, prednost je što model može objasniti stvaranje planeta čak i u najranijim fazama protoplanetarnog diska, fragmentacija diska može se dogoditi i na jako velikim udaljenostima, kao i u područjima koji su siromašni metalima, što bi objasnilo pojedina opažanja [12].

Na koncu, model nakupljanja jezgre i model nestabilnosti diska međusobno nisu isključivi. U početnim fazama razvoja protoplanetarnih diskova vjerojatniji je model nestabilnosti diska (približno nakon nekoliko desetaka tisuća godina od nastanka diska), dok se nakupljanje jezgre događa u kasnijim fazama (približno nakon nekoliko milijuna godina od nastanka diska). Vjeruje se da je nakupljanje jezgre dominantan mehanizam pri formiranju ledenih divova i plinovitih divova manjih masa, a da je nestabilnost diska vjerojatniji proces za nastajanje divovskih planeta izuzetno velikih masa.

3.3. Teleskopi i pregledi neba

3.3.1. SDSS

Sloanov digitalni pregled neba (engl. *Sloan Digital Sky Survey*, *SDSS*) vjerojatno je najambicioznije i najproduktivnije astronomsko istraživanje do danas [13]. Prvi pregled neba započeo je 2000. godine, puštanjem u pogon instrumenata smještenih u *Apache Point* opservatoriju u Novom Meksiku. Instrumente SDSS istraživanja čine teleskop promjera 2.5 m, kamera sastavljena od pet filtera te četiri spektrograфа koji su specijalizirani za pojedina istraživanja.

Kamera polako prikuplja podatke s CCD uređaja, poredanih u polje od šest stupaca po pet redaka. Teleskop snima nebo tako da slike na CCD uređaje stižu istom brzinom kojom kamera čita podatke CCD uređaja. Kako se slika objekta s teleskopa kreće jednim stupcem CCD uređaja, tako CCD u svakom redu čita podatke o objektu. Na ovaj način kamera iz svakog reda stvara po jednu sliku, što ukupno čini pet slika istog objekta na različitim valnim duljinama. Ostala 24 CCD uređaja služe za prikupljanje astrometrijskih podataka. U Tablici 3.1 prikazane su srednje vrijednosti valnih duljina za pojedini filter.

<i>u</i> filter	<i>g</i> filter	<i>r</i> filter	<i>i</i> filter	<i>z</i> filter
$\lambda = 0.3551 \mu\text{m}$	$\lambda = 0.4686 \mu\text{m}$	$\lambda = 0.6166 \mu\text{m}$	$\lambda = 0.7480 \mu\text{m}$	$\lambda = 0.8932 \mu\text{m}$

Tablica 3.1 Prikaz srednjih vrijednosti valnih duljina za pojedini filter SDSS kamere.

SDSS istraživanje do sada se sastojalo od četiri faze. Prva faza, SDSS-I, rezultirala je pregledom preko 8000 kvadratnih stupnjeva neba, pri čemu se fokus stavljaо na istraživanja galaksija i kvazara. Potom je 2005. godine pokrenuta druga faza, SDSS-II, tijekom koje su se vršila tri različita istraživanja. *Sloan Legacy* istraživanje dovršilo je istraživanja započeta u prvoj fazi, a konačni skup podataka sadržavaо je slike i spektre od čak 230 milijuna objekata, uključujući 930 000 galaksija, 120 000 kvazara i 255 000 zvijezda [13]. SEGUE (engl. *Sloan Extension for Galactic Understanding and Exploration*) istraživanje fokusiralo se na razvoj i strukturu naše galaksije, a rezultiralo je spektrima 240 000 zvijezda raznih kategorija. Treće istraživanje SDSS-II faze bilo je *Sloan Supernova* istraživanje, koje se očito fokusiralo na pronalazak i istraživanje supernova. Tijekom tri mjeseca, koliko je istraživanje trajalo, otkriveno je minimalno 500 spektroskopski potvrđenih supernova tipa Ia.

Podaci prikupljeni istraživanjima objavljeni su na godišnjoj bazi, tijekom svih faza SDSS istraživanja. Posljednja objava je DR12⁸, dvanaesta po redu, a sadrži konačne podatke SDSS-III istraživanja. SDSS-III faza, započeta 2008. godine, a završena 2014., sastojala se od čak četiri različita istraživanja: APOGEE (engl. *Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment*), BOSS (engl. *Baryon Oscillation Spectroscopic Survey*), SEGUE – 2 (engl. *Sloan Extension for Galactic Understanding and Exploration 2*) i MARVELS (engl. *Multi-Object APO Radial Velocity Exoplanet Large-area Survey*).

BOSS istraživanje trajalo je od 2009. do 2014. godine, fokusiralo se na mapiranje prostorne distribucije galaksija i kvazara s ciljem detekcije akustičnih oscilacija bariona, koje su karakteristične za rane faze svemira. Rezultat BOSS istraživanja je najveća trodimenzionalna karta galaksija ikad stvorena, objavljena u desetom izvješću podataka. SEGUE–2 nastavak je istraživanja SDSS-II faze, a kao i kod APOGEE istraživanja, u fokusu su struktura i razvoj naše galaksije. SEGUE-2 istraživanje trajalo je od 2008. do sredine 2009. godine, a rezultiralo je s dodatnih 118 151 slika zvijezda iz više kategorija [14]. APOGEE istraživanje koristilo je infracrvenu spektroskopiju visoke rezolucije kako bi pokušalo dobiti jasnu sliku diska i izbočina naše galaksije, a koju nije jednostavno vidjeti zbog velike količine kozmičke prašine. Istraživanje je rezultiralo mjerenjima radijalnih brzina i kemijske strukture preko 100 000 crvenih divova, a trajalo je od 2011. do kraja SDSS-III istraživanja.

Vjerojatno najvažnije istraživanje za ovo razmatranje je MARVELS istraživanje, koje je trajalo od sredine 2008. godine pa do sredine 2012. godine. MARVELS istraživanje rezultiralo je izuzetno preciznim mjerenjima radijalnih brzina približno 3500 jedinstvenih zvijezda, s ciljem otkrivanja divovskih plinovitih planeta. Svaku zvijezdu promatralo se približno 20 do 40 puta, s prosječnim vremenom snimanja od 50-60 minuta. Zahvaljujući visokoj preciznosti mjerenja i promatranjem velikog broja raznih značajki zvijezda, MARVELS istraživanje pružilo je kritični skup podataka za testiranje teorijskih modela stvaranja, migracije i dinamičke evolucije sustava divovskih planeta. Posebno velika pozornost pridavala se rijetkim sustavima poput planeta s ekstremnim ekscentricitetom i objekata u tzv. pustinji smeđeg patuljka. Rezultati istraživanja doprinijeli su otkrićima i korekcijama dotadašnjih opažanja, poput otkrića kandidata za smeđe patuljke, značajki

⁸ <http://www.sdss.org/dr12/>

postojećih smeđih patuljaka ili pak otkrića binarnih zvjezdanih sustava koji su prethodno smatrani planetarnim sustavom [14].

U tijeku je SDSS-IV istraživanje, započeto 2014. godine, a koje uključuje nastavak APOGEE istraživanja, eBOSS kozmološko istraživanje kvazara i galaksija te MaNGA istraživanja. eBOSS sastoji se od TDSS (engl. *Time-Domain Spectroscopic Survey*) istraživanja, za kojeg se procjenjuje da će spektroskopski analizirati i identificirati 100 000 promjenjivih zvijezda, s ciljem što boljeg razumijevanja fizikalnih svojstava zvijezda i kvazara te SPIDERS (engl. *Spectroscopic Identification of eROSITA Sources*) istraživanja, koje će nastojati spektroskopski identificirati 50 000 kvazara koji emitiraju X-zrake, detektiranih novim eROSITA teleskopom. Treće istraživanje četvrte faze naziva se MaNGA (engl. *Mapping Nearby Galaxies at APO*), čiji će fokus biti razumijevanje „životnog ciklusa“ susjednih galaksija, od otkrivanja tragova rođenja i nakupljanja, preko trenutno aktivnog rasta stvaranjem zvijezda do konačnog stadija gašenja galaksija.

U proteklih 15 godina, SDSS istraživanje pružilo je brojna otkrića na polju kozmologije, kvazara, galaksija, Mliječnog puta, Sunčevog sustava i zvijezda. Podaci SDSS istraživanja korišteni su u preko 5800 recenziranih publikacija, kako u astronomiji, tako i u drugim znanostima. Koliko je poznato, ove publikacije citirane su preko 245 000 puta [14]. Obujam podataka SDSS istraživanja toliko je velik da rezultate ovih istraživanja više nisu u mogućnosti analizirati samo profesionalni astronomi te se stvorila velika potreba za kreiranjem projekata u kojima sudjeluju volonteri, poput *Galaxy Zoo*, *Supernova Zoo*, *Disk Detective* i ostalih *Zooniverse* astrofizičkih projekata, a koji uvelike doprinose detekciji i klasifikaciji nebeskih tijela.

3.3.2. DSS

Digitized Sky Survey digitalna je verzija nekoliko fotografskih atlasa noćnog neba, u E, V, J, R i N ljuskama [15]. Prva generacija DSS istraživanja objavljena je 1994., a sadržavala je deseterostruko komprimirane podatke na 102 CD-ROM diska. Ovu digitalnu verziju atlasa prvi je izdao odjel za kataloge i istraživanja (engl. *Catalogs and Survey Branch*) znanstvenog instituta svemirskih teleskopa (engl. *Space Telescope Science Institute*). Slike sjeverne hemisfere većinom su pristigle s teleskopa *Palomar Observatory*

Sky Survey istraživanja, dok su slike s južne polutke većinom načinjene *UK Schmidt* teleskopom na Anglo-Australskom opservatoriju.

Kako su se u međuvremenu snimke i istraživanja neba poboljšavala, precizirala i sadržavala sve veću količinu podataka, 2006. godine izdana je druga generacija digitalnog pregleda neba, DSS-II. Ova verzija sadržavala je rezultate druge generacije pregleda neba *Oschin Schmidt* teleskopom na Palomar opservatoriju (engl. *Palomar Observatory Sky Survey II*), kao i pregleda neba *UK Schmidt* teleskopom na Anglo-Australskom opservatoriju.

Rezultate DSS pregleda neba, odnosno slike nebeskih objekata prve i druge generacije DSS istraživanja moguće je pronaći na web stranicama organizacija i instituta koje su doprinijele kreiranju ovog digitalnog pregleda neba. Konkretno, slike tijela su dostupne na web stranicama europskog južnog opservatorija⁹ (engl. *European Southern Observatory*), potom znanstvenog instituta svemirskih teleskopa¹⁰ te konačno na web stranicama kanadskog astronomskog podatkovnog centra¹¹.

3.3.3. 2MASS

Pregled neba na valnim duljinama blizu dva mikrona (engl. *Two-Micron Sky Survey*) započeo je u lipnju 1997. godine, pregledom sjeverne hemisfere 1.3 metarskim teleskopom u Hopkins planinama. U ožujku 1998. godine započeto je i snimanje na južnoj polutci, također 1.3 metarskim teleskopom, u Čileu. Istraživanja na obje polutke završena su u veljači 2001. godine. Projektom je upravljalo Sveučilište u Massachusettsu, koje je bilo odgovorno i za razvoj infracrvenih kamera i računalnih sustava koji su se koristili u oba postrojenja. Za obradu prikupljenih podataka te konstrukciju i produkciju rezultata obrade bio je zadužen IPAC (engl. *Infrared Processing and Analysis Center*), NASA-in centar za obradu i analizu podataka prikupljenih snimanjima u infracrvenom spektru. Uz ove velike institucije, u 2MASS istraživanju sudjelovali su i brojni znanstveni timovi s raznih institucija. Projekt su financirali NASA i NSF (engl. *National Science Foundation*) [16] .

⁹ <http://archive.eso.org/dss/dss>

¹⁰ http://archive.stsci.edu/cgi-bin/dss_form

¹¹ <http://cadwww.dao.nrc.ca/cadcbn/getdss>

Neposredne znanstvene koristi 2MASS istraživanja uključuju, primjerice, najpreciznije snimke Mliječnog puta ikada kreirane. Naime, kako je 2MASS istraživanje pionir u snimanju neba u infracrvenom spektru na površini Zemlje, po prvi put su postale vidljive stvarne raspodjele masa i najvećih struktura Svemira, budući da se prvi put na slikama gotovo u potpunosti moglo otkloniti utjecaje međuzvezdane prašine. Izuzetno bitna mogućnost koju snimanje u infracrvenom dijelu spektra nudi je otkrivanje rijetkih, ali astronomski važnih objekata poput zvijezda ekstremno niskog luminoziteta, smeđih patuljaka, ili pak objekata koji u svojoj blizini imaju veliku količinu kozmičke prašine, poput mladih zvijezda s protoplanetarnim diskovima, aktivnih galaksijskih jezgri i sličnih objekata.

2MASS istraživanje snimalo je cijelo nebo, u tri dijela elektromagnetskog spektra: J-ljusci ($\bar{\lambda}=1.235\ \mu\text{m}$), H-ljusci ($\bar{\lambda}=1.662\ \mu\text{m}$) i K_s-ljusci ($\bar{\lambda}=2.159\ \mu\text{m}$). Rezultati istraživanja uključuju nekoliko baza podataka, kataloga i atlasa nebeskih tijela. Primjerice, katalog točkastih izvora (engl. *Point Source Catalog*) sastoji se od preko 500 milijuna slika zvijezda i galaksija, katalog produženih izvora, XSC (engl. *Extended Source Catalog*) sastoji se od 1.6 milijuna klasificiranih galaksija. Veliki atlas galaksija (*Large Galaxy Atlas*) sadrži približno 600 kuglastih (globularnih) skupova zvijezda, a rezultat istraživanja je i atlas cijelog neba u infracrvenom dijelu elektromagnetskog spektra.

3.3.4. WISE

Wide-field Infrared Survey Explorer pregled je neba u infracrvenom dijelu spektra, svemirskom letjelicom čija je osjetljivost detektora stotinama puta veća od IRAS satelita, koji je bio u pogonu 1983. godine [17, 18]. Zahvaljujući kriostatu koji održava teleskope ovog satelita na temperaturi od približno 12 K, WISE pregledi neba daju slike objekata na valnim duljinama srednjeg infracrvenog spektra, konkretno na 3.4 μm , 4.6 μm , 12 μm pa čak i 22 μm . Budući da kriostat može trajati približno 10 mjeseci, WISE istraživanja trajala su od prosinca 2009. do kolovoza 2010. godine, nakon čega su se otprilike mjesec dana nastavila istraživanja na tri valne duljine. Potom je pokrenuto NEOWISE istraživanje kojemu nije potreban kriogen, a koji vrši preglede neba na valnim duljinama od 3.4 i 4.6 μm . Prvo NEOWISE istraživanje trajalo je od rujna 2010 do početka veljače 2011. godine, a u prosincu 2013. godine ponovno je aktivirano traje do danas [17].

WISE istraživanje se, pored objekata bliskih Zemlji i asteroida unutar našeg sustava, fokusiralo i na pronalazak smeđih patuljaka. Očekivalo se da će WISE pronaći približno tisuću ovih objekata te da će udvostručiti broj objekata sličnih zvijezdama unutar 25 svjetlosnih godina od Zemlje. Najdalji objekti koje je WISE promatrao su galaksije, čiji je akronim ULIRG (engl. *Ultraluminous Infrared Galaxies*). Ostala istraživanja su nove zvijezde, protoplanetarni diskovi u okolini mladih zvijezda, detaljni pregledi strukture naše galaksije, nakupine galaksija u dalekom Svemiru i ostalo [18].

WISE znanstveni tim predvodi Sveučilište u Kaliforniji, Los Angeles, sistemsko inženjerstvo i upravljanje misijom predvodi Jet Propulsion laboratorij, teleskope je izgradio Space Dynamics laboratorij iz Utaha, a gradnju svemirske letjelice odradila je Ball Aerospace & Technology korporacija. Analizu, arhiviranje i distribuciju znanstvenih podataka preuzeo je IPAC centar, a edukaciju i širenje svijesti o projektu među širom publikom predvodi UCB, Sveučilište u Kaliforniji, Berkeley.

Rezultati WISE istraživanja objavljeni su u nekoliko kataloga, koji se sastoje od preko 300 milijuna tijela koji su izvori infracrvenog zračenja. Kombinacija podataka pojedinačnih faza istraživanja objavljena je na koncu u AllWISE katalogu, u studenom 2013. godine. U ožujku 2015. objavljen je skup podataka reaktiviranog NEOWISE istraživanja. AllWISE katalog izvora infracrvenog zračenja sadrži točne pozicije, mjerenja prividnih kretanja objekata i statistiku promjenjivosti tokova od preko 747 milijuna objekata. Nadalje, ova objava podataka uključuje i AllWISE više-epohalnu fotometrijsku bazu podataka, odnosno preko 42 milijarde fotometrijskih mjerenja svakog objekta u katalogu. Katalog uključuje i tablicu odbijenih objekata, koja se sastoji od preko 484 milijuna izvora, odbijenih većinom jer su duplikati.

Neka od većih otkrića WISE istraživanja su otkriće i snimke najsvjetlije galaksije u Svemiru¹², koja svijetli više nego 300 trilijuna Sunca, potom otkrića milijuna skrivenih crnih rupa¹³, kao i najhladnijih klasa zvijezda^{14,15}. Najveći uspjeh NEOWISE istraživanja do sada je lociranje mogućih izvora određene grupe asteroida blizu Zemlje¹⁶ i lociranje prvog poznatog Trojan asteroida koji ima isti orbitalni put oko Sunca kao i Zemlja¹⁷.

¹² <http://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?feature=4593>

¹³ <http://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?feature=4073>

¹⁴ <http://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?feature=3113>

¹⁵ <http://www.nasa.gov/jpl/wise/spitzer-coldest-brown-dwarf-20140425>

¹⁶ <http://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?feature=4678>

¹⁷ <http://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?feature=3080>

3.4. *Disk Detective projekt*

Prethodno su ukratko prikazani procesi nastajanja zvijezda, razvoja cirkumzvezdanih, protoplanetarnih i debrisa diskova te s njima direktno povezani nastanak planeta. Prikazano je i nekoliko projekata znanosti za građanstvo u kojima su volonteri značajno doprinijeli razvoju znanosti. Kao projekt iz *Zooniverse* obitelji koji se fokusira na klasifikaciju zvijezda s ciljem pronalaska protoplanetarnih diskova kozmičke prašine, *Disk Detective* projekt predstavlja fuziju do sada predstavljenih fenomena.

*Disk Detective*¹⁸ projekt priključuje se potrazi za diskovima kozmičke prašine, konkretno debris i YSO diskovima (cirkumzvezdane i protoplanetarne diskove organizatori projekta nazivaju jednim imenom: *Young Stellar Object* diskovi), nastavljajući tako znanstvenu potragu koja traje preko tri desetljeća. Procjenjuje se da je samo WISE teleskop generirao tisuće slika debrisa i YSO diskova. Budući da se ove slike nalaze među milijunima slika galaksija, nebula i ostalih nebeskih objekata, procjenjuje se da bi profesionalnim znanstvenicima trebali deseci godina da iz ovako velike šume podataka pronađu zvezdane sustave koji su dobri kandidati za stvaranje planeta. Kako uz diskove kozmičke prašine svjetlost infracrvenih valnih duljina zrače i galaksije, asteroidi, AGN i međuzvezdani oblaci prašine, računalni algoritmi dizajnirani za automatsku potragu za diskovima mogu se lako omesti te je iz tog razloga jako bitna vizualna klasifikacija objekata.

Kako bi se osigurala kvaliteta klasifikacija, projekt koristi slike WISE, 2MASS, DSS i SDSS istraživanja istog objekta. Navedena istraživanja odabrana su kako bi se sudioniku projekta prikazale slike jednog objekta kroz gotovo sve valne duljine na kojima je objekt vidljiv, od 0.665 μm iz DSS2 *Blue* do 22 μm iz WISE 4 istraživanja. Tijekom klasifikacije, volonteru se prikazuju slike jednog objekta kroz sve moguće vrijednosti valnih duljina, nakon čega se korisniku ponudi šest opcija na izbor. Opcije uključuju pojave koje bi se na slikama mogle vidjeti, a koje znače da objekt najvjerojatnije nije dobar kandidat za zvijezdu s debrisi ili YSO diskom. Ukoliko korisnik ne uoči nijednu od ponuđenih specifičnosti, tada može odabrati opciju „ništa od navedenog/dobar kandidat“.

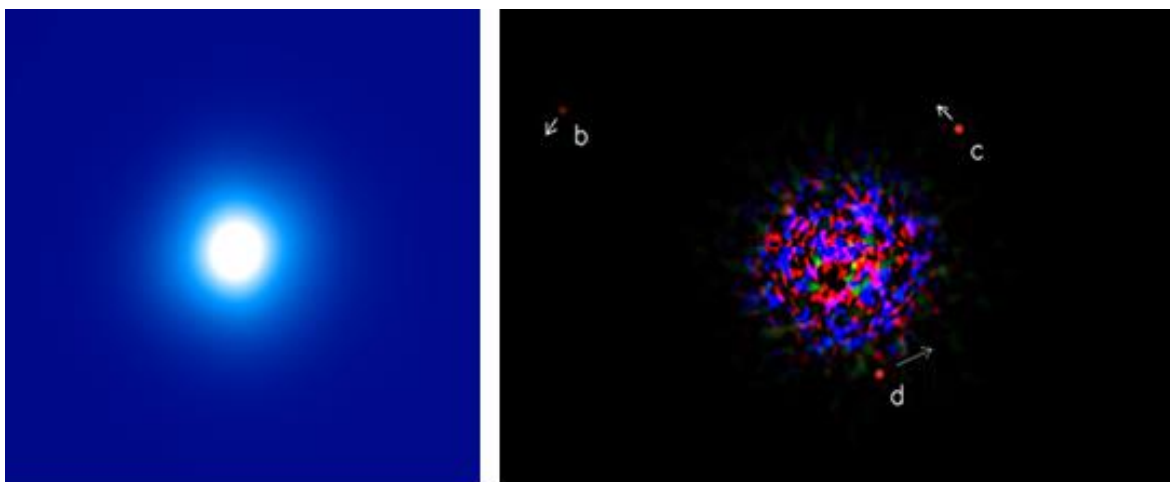
Vrijedi spomenuti da je *Disk Detective* prvi *Zooniverse* projekt kojeg je financirala NASA, s ciljem stvaranja konkretnih znanstvenih rezultata koji bi se naknadno objavili u priznatim znanstvenim časopisima. Projekt koristi i podatke iz NASA/IPAC arhiva, u

¹⁸ www.diskdetective.org

suradnji s JPL (engl. *Jet Propulsion Laboratory*) i CIT (engl. *California Institute of Technology*) institucijama.

Slike koje se prikazuju volonterima koji pristupaju *Disk Detective* projektu unaprijed su izabrane tako da korisnici rade s objektima koji jako zrače na valnim duljinama u infracrvenom dijelu elektromagnetskog spektra. Analiza ovih slika je bitna zato što znanstvenici mogu ustanoviti koji tipovi objekata ponajviše priječe precizne klasifikacije. Nakon zaprimljenih podataka, znanstvenici sortiraju slike za koje je većina korisnika označila da su dobri kandidati za postojanje debris ili YSO diska. Planete izvan Sunčevog sustava koji su dovoljno blizu i koji su dovoljno sjajni direktno će snimati *Hubble* i *James Webb* svemirske letjelice. Primjerice, na Slici 3.4 lijevo prikazan je primjer slike kandidata koja se početno prikazuje korisniku, tj. slika objekta koji bi mogao biti zvijezda s diskom kozmičke prašine u svojoj blizini. Na desnoj strani je prikazan planetarni sustav HR 8799, koji je snimljen Gemini sjevernim teleskopom.

Jedna od prednosti ovih istraživanja je i mogućnost identifikacije diskova na neočekivanim mjestima. Većina YSO diskova pronađena je unutar ili blizu nakupina mladih zvijezda, ali je *Disk Detective* projektom možda moguće pronaći i neke YSO diskove izvan tipičnih lokacija. Također, većina poznatih debris diskova orbitira oko zvijezda koje su u istoj fazi razvoja kao i Sunce. Postoji mogućnost da *Disk Detective* projekt u WISE skupovima podataka pronađe i debris diskove oko zvijezda koje su mnogo razvijenije od Sunca, što bi pak pomoglo astronomima u istraživanjima mogućnosti nastanka života oko razvijenijih zvijezda.

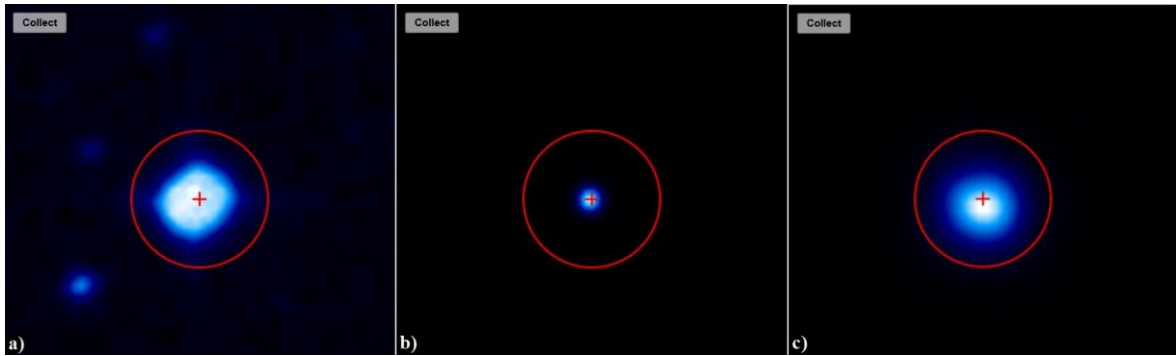


Slika 3.4: Usporedba slike koja se prikazuje sudioniku *Disk Detective* projekta u procesu klasifikacije (lijevo) i HR 8799 planetarnog sustava, koji je snimljen Gemini sjevernim teleskopom (desno). Slika je preuzeta sa službene web stranice *Disk Detective* projekta (www.diskdetective.org).

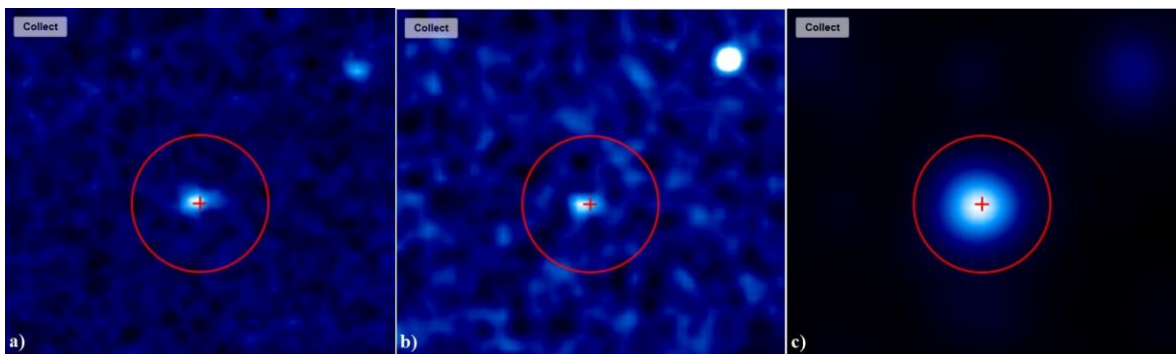
3.4.1. *Određivanje dobrog kandidata*

Objekt na slici koja se prikazuje volonterima dobar je kandidat za disk, ako je unutar crvenog kruga vidljiv samo jedan objekt koji se sa prolaskom kroz slike ne odmiče previše od malog križića u sredini, ako se u slikama WISE istraživanja ne vidi prazan krug, ako objekt ostaje unutar granica crvenog kruga te na koncu ukoliko je objekt kružnog oblika u DSS2 i 2MASS slikama. U slučaju da korisnik primijeti bilo koju od ovih nepravilnosti, prikazani objekt najvjerojatnije ne sadrži diskove kozmičke prašine u kojima bi se mogli formirati planeti.

Kod objekata čiji je oblik, primjerice, izduženi ili spiralni, velika je vjerojatnost da je na slici prikazana cijela galaksija, a ne samo jedan zvjezdani sustav. Na većini slika, prikazani objekt neće imati u potpunosti kružni oblik, već će se vidjeti male distorzije u nekim okvirima. Primjer jednog takvog kandidata prikazan je na Slici 3.5. Na DSS2 slikama objekt je deformiran, čak pomalo pikseliziran. Iako se ova pojava javlja na svim DSS2 valnim duljinama, na slikama 2MASS i WISE istraživanja objekt je gotovo savršenog kružnog oblika. Prema tome, može se zaključiti da je u ovom slučaju vjerojatno pogreška u optici teleskopa koji su generirali slike DSS2 pregleda. Kako se ne primjećuju druge deformacije, ovo je dobar kandidat za postojanje protoplanetarnih diskova. Također, kada se objekt čini deformiranim na jedan način u jednom teleskopu, a vidljiva je potpuno drugačija deformacija u drugom teleskopu, taj objekt je također dobar kandidat za postojanje diskova. Općenito se može zaključiti da kandidat vjerojatno nije dobar za postojanje planetarnog sustava, ako se ista anomalija ponavlja u minimalno dva istraživanja i na više valnih duljina. Na Slici 3.6 nalazi se primjer objekta koji je izdužen po x-osi. Kako objekt izgleda izduženo kroz više teleskopa i na gotovo svim valnim duljinama, ovo je primjer objekta koji nije dobar kandidat za postojanje planetarnog sustava. Također, na većini slika vidljiv je i objekt u gornjem desnom kutu pa se može pretpostaviti da gravitacijske sile ovog objekta najvjerojatnije utječu na izgled sustava u sredini.



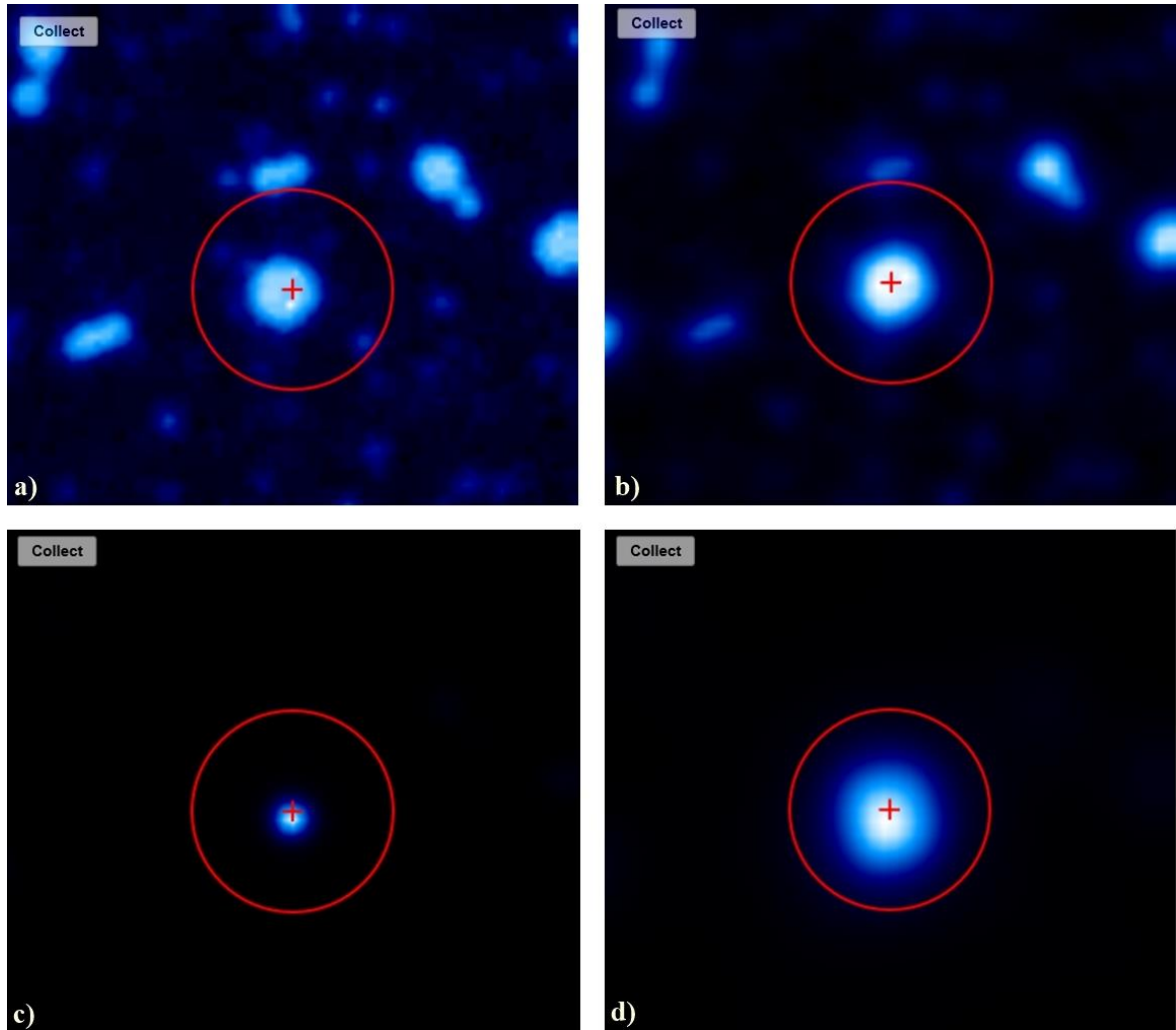
Slika 3.5: Primjer zvjezdanog sustava koji vjerojatno sadrži potencijalni protoplanetarni disk. a) Slika DSS2 istraživanja na valnoj duljini od $1.15 \mu\text{m}$, b) Slika 2MASS istraživanja, u J ljsuci, na valnoj duljini od $1.24 \mu\text{m}$, c) Slika WISE 1 istraživanja na valnoj duljini od $3.4 \mu\text{m}$.



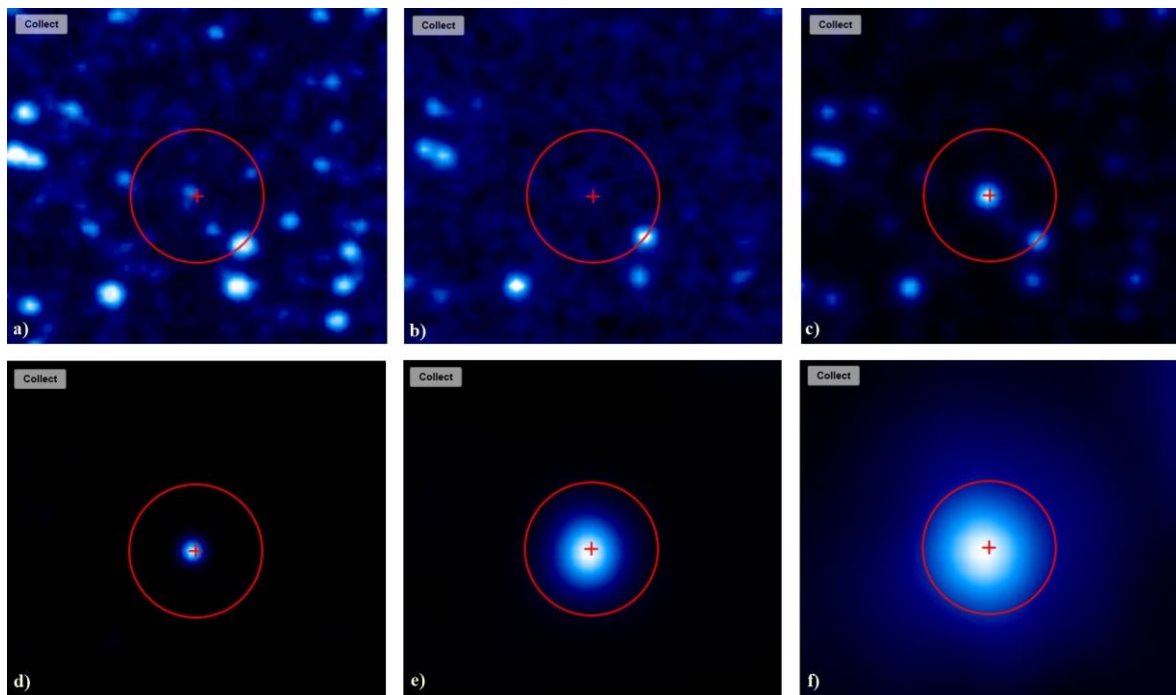
Slika 3.6: Primjer objekta koji ne sadrži planetarni sustav. a) Slika DSS2 istraživanja, na valnoj duljini od $0.975 \mu\text{m}$, b) Slika 2MASS istraživanja, unutar J ljsuke, na valnoj duljini od $1.24 \mu\text{m}$, c) Slika WISE 2 istraživanja na valnoj duljini od $4.6 \mu\text{m}$.

Ukoliko se na minimalno dvije valne duljine unutar crvenog kruga pojavljuju dva ili više objekata, tada objekt od interesa nije dobar kandidat za postojanje debrisa ili YSO diskova. Naime, kako su u tom slučaju objekti previše blizu jedan drugome, slike i dijagrame objekta koji nam je od interesa remeti susjedni objekt. Na Slici 3.7 prikazan je primjer objekta koji ima nekoliko drugih objekata u blizini. Na Slici 3.7 a), slikanoj na valnoj duljini od $0.665 \mu\text{m}$, vidljivo je nekoliko drugih objekata unutar crvenog kruga. Na Slici 3.7 b) vidljivo je prodiranje svjetlosti jednog objekta u crveni krug na valnim duljinama od $0.975 \mu\text{m}$. Na slikama 2MASS i WISE istraživanja (Slika 3.7 c) i d)) nisu vidljivi drugi objekti unutar crvenog kruga. Osobno bih ovaj objekt svrstala u kategoriju loših kandidata, ali je ovaj objekt, konsenzusom svih odgovora, ipak svrstan u kandidate u kojima postoji mogućnosti egzistencije debrisa ili YSO diskova. Upravo zbog ovakvih graničnih situacija prakticira se višestruko prikazivanje istog objekta različitim pristupnicima. Ako se nakon desetaka klasifikacija konsenzusom odgovora zaključi da je objekt dobar kandidat, objekt se prosljeđuje profesionalnim znanstvenim timovima na istraživanje.

Na Slici 3.8 prikazan je slučaj gdje, uz objekt od interesa, unutar crvenog kruga postoji još jedan objekt. Budući da je ova situacija jasno vidljiva na tri valne duljine ($0.665\ \mu\text{m}$, $0.975\ \mu\text{m}$ i $1.15\ \mu\text{m}$), objekt je klasificiran kao loš kandidat za postojanje YSO ili debris diskova, iako dodatni objekti unutar kruga nisu vidljivi na slikama 2MASS i WISE istraživanja.

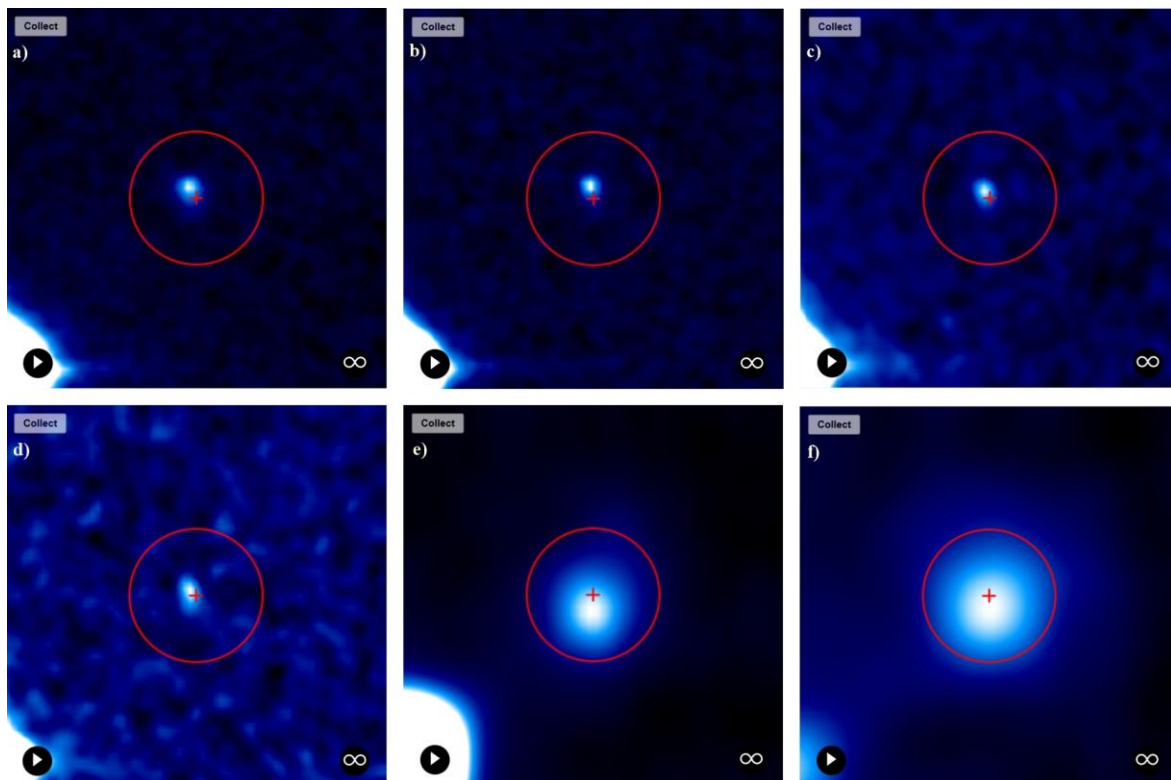


Slika 3.7: Primjer graničnog slučaja postojanja višestrukih objekata unutar crvenog kruga. a) Slika DSS2 Blue istraživanja ($\lambda = 0.665\ \mu\text{m}$) na kojoj je jasno vidljiv veći broj drugih objekata unutar crvenog kruga, b) Slika DSS2 Red istraživanja ($\lambda = 0.975\ \mu\text{m}$) na kojoj je slabo vidljivo granično prodiranje svjetlosti drugog objekta u crveni krug, c) Slika 2MASS istraživanja u J ljusci ($\lambda = 1.24\ \mu\text{m}$) na kojoj nije vidljiv niti jedan drugi objekt unutar crvenog kruga, d) Slika WISE 1 istraživanja ($\lambda = 3.4\ \mu\text{m}$) na kojoj također nisu vidljivi drugi objekti unutar crvenog kruga.



Slika 3.8: Primjer lošeg kandidata za postojanje planetarnog sustava, zbog prisustva više objekata unutar crvenog kruga na minimalno dvije valne duljine. a) Slika DSS2 Blue istraživanja ($\lambda = 0.665 \mu\text{m}$) na kojoj je jasno vidljiv veći broj drugih objekata unutar crvenog kruga, b) Slika DSS2 Red istraživanja ($\lambda = 0.975 \mu\text{m}$) na kojoj je vidljivo jako prodiranje svjetlosti drugog objekta u crveni krug. Na ovoj slici čak nije niti vidljiv objekt od interesa, c) Slika DSS2 IR istraživanja ($\lambda = 1.15 \mu\text{m}$), na kojoj je još jednom jasno uočljiv dodatni objekt u crvenom krugu, d) Slika 2MASS istraživanja u H ljusci ($\lambda = 1.66 \mu\text{m}$) na kojoj nije vidljiv niti jedan drugi objekt unutar crvenog kruga, e) Slika WISE 2 istraživanja ($\lambda = 4.6 \mu\text{m}$) na kojoj također nije vidljiv niti jedan drugi objekt unutar crvenog kruga, f) Slika WISE 4 istraživanja ($\lambda = 22 \mu\text{m}$) na kojoj nije vidljiv dodatni objekt unutar crvenog kruga, ali je vidljiva svjetlost drugog objekta koji se nalazi u blizini objekta od interesa, a koja vjerojatno utječe na svojstva objekta u sredini kruga.

Na Slici 3.9 prikazan je objekt koji definitivno nije dobar kandidat jer ne zadovoljava više kriterija. Prije svega, na slikama DSS2 i 2MASS istraživanja objekt nije kružnog oblika, očito nije riječ o problemu s optikom jednog teleskopa pa bismo ga već na osnovu ove karakteristike eliminirali iz kategorije dobrog kandidata za planetarni sustav. U slikama 2MASS istraživanja objekt se miče s križića u sredini pa je to dodatni kriterij za diskvalifikaciju. U slikama WISE 3 i 4 istraživanja svjetlost koju isijava objekt prelazi granice crvenog kruga. Na ovim slikama primjetan je i tanki sjaj između dva objekta, koji ukazuje na to da će objekt u donjem lijevom kutu uvelike utjecati na analizu objekta od interesa. Prema tome, koliko god zanimljiv ovaj objekt bio, zbog svih ovih karakteristika, nije riječ o dobrom kandidatu za postojanje planetarnog sustava.



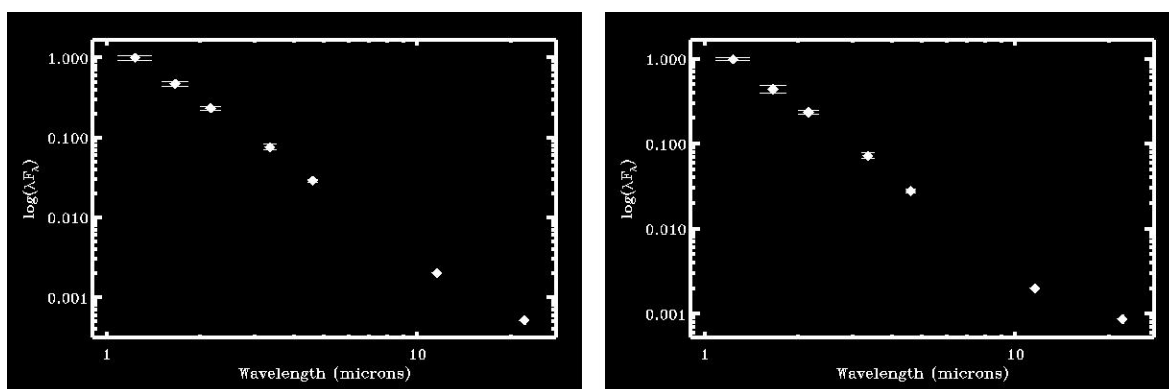
Slika 3.9: Primjer objekta koji prema nekoliko kriterija ne može biti kandidat za postojanje YSO ili debris diska. a) Slika DSS2 Red istraživanja ($\lambda = 0.975 \mu\text{m}$) na kojoj je vidljivo da objekt nije potpuno kružnog oblika te da nije centriran unutar kruga, b) Slika DSS2 IR istraživanja ($\lambda = 1.15 \mu\text{m}$) na kojoj je također vidljivo odstupanje od centra, c) Slika 2MASS istraživanja u J ljusci ($\lambda = 1.24 \mu\text{m}$) na kojoj je još jednom jasno uočljivo odstupanje, ali i izduženi oblik objekta, d) Slika 2MASS istraživanja u K ljusci ($\lambda = 2.16 \mu\text{m}$), na kojoj se, na osnovu elongacije objekta, može primijetiti da je objekt najvjerojatnije galaksija, a ne zvijezda s diskom, e) Slika WISE 3 istraživanja ($\lambda = 12 \mu\text{m}$) na kojoj je vidljivo odstupanje od središta, ali i lagani prelazak svjetlosti objekta izvan granica kruga, f) Slika WISE 4 istraživanja ($\lambda = 22 \mu\text{m}$), na kojoj je jasno vidljiva svjetlost izvan granica kruga, kao i tanki sjaj koji povezuje objekt od interesa s bliskim objektom u donjem lijevom kutu.

3.4.2. Dodatne informacije o objektima

Službena web stranica projekta, uz mogućnost klasifikacije objekata, osnovnih informacija o projektu i pomoći korisnicima, posjeduje i poseban dio posvećen diskusijama o objektima, tzv. *Disk Detective Talk*. Odabirom ove opcije na glavnoj stranici, korisnik za trenutno promatrani objekt može, uz klasifikaciju ostalih korisnika, vidjeti i SED dijagrame objekta, kao i direktno pristupiti SIMBAD bazi podataka.

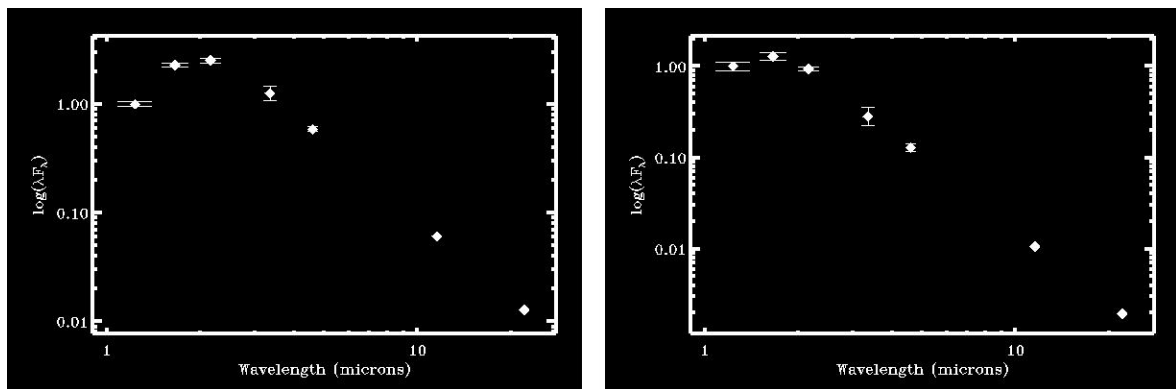
Dijagram spektralne raspodjele energije (engl. *Spectral Energy Distribution*, SED), odnosno grafički prikazana ovisnost gustoće zračenja energije u ovisnosti o valnim duljinama može detaljnije otkriti o kakvom je objektu točno riječ. Primjerice, kada je na slikama prikazana mlada zvijezda bez diska kozmičke prašine, SED dijagram će za tu

zvijezdu imati gotovo jednak oblik kao i dijagram zračenja crnog tijela. Ukoliko korisnik *Disk Detective* klasifikatora ne može po slikama prepoznati o kojim objektima je riječ niti jesu li ti objekti dobri kandidati za postojanje diskova kozmičke prašine, za svaki objekt moguće je pogledati SED dijagram. U nastavku ću prikazati SED dijagrame zvijezda koje možda u svom sustavu imaju i diskove kozmičke prašine. Zvijezde je u SED dijagramima moguće prepoznati prema obliku krivulje, odnosno ako krivulja ima oblik krivulje Wienovog zračenja, objekt je najvjerojatnije zvijezda. Primjerice, kako mlade, vruće zvijezde najviše energije zrače na manjim valnim duljinama, tako je Slika 3.10 dobar primjer SED dijagrama dvaju mladih zvijezda, svrstanih u klasu A0.



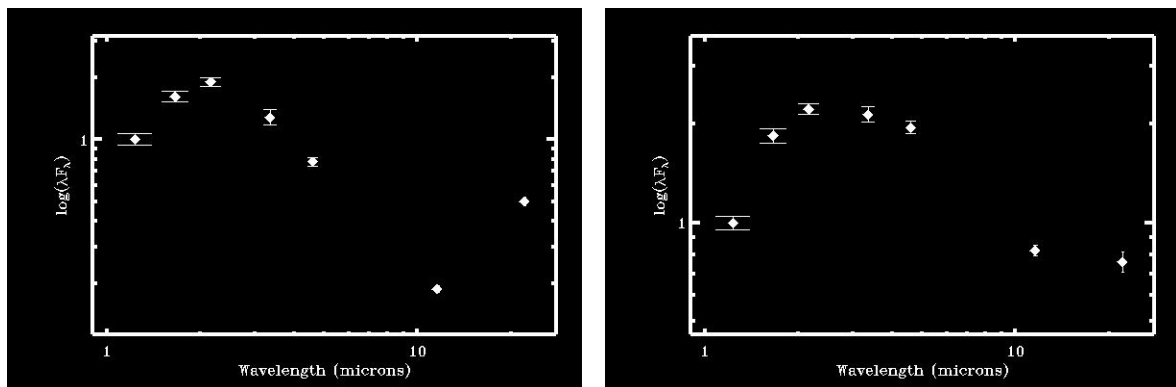
Slika 3.10: SED dijagram AWI0005a9r (lijevo) i AWI0005zvz (desno) zvijezda. Zvijezde su klasificirane kao A0 zvijezde, budući da najviše energije zrače na manjim valnim duljinama te im energija zračenja opada gotovo linearno s porastom valne duljine.

Slika 3.11 prikazuje SED dijagram zvijezda u kasnijem stadiju razvoja. Naime, vrh količine emitirane energije pomaknut je prema većim vrijednostima valnih duljina, što prema Wienovom zakonu zračenja znači da je riječ o hladnijim zvijezdama. Isto tako, može se primijetiti da ove zvijezde emitiraju manje energije na valnoj duljini od 1 mikrona od mladih zvijezda. Uz činjenicu da su zvijezde hladnije, ovaj efekt može uzrokovati i raspršenje svjetlosti o međuzvjezdane čestice kozmičke prašine.



Slika 3.11: SED dijagram AWI0001q0x (lijevo) i AWI00019yb (desno) zvijezda. Zvijezde se nalaze u kasnijoj fazi razvoja, budući da najviše energije zrače na nešto većim valnim duljinama.

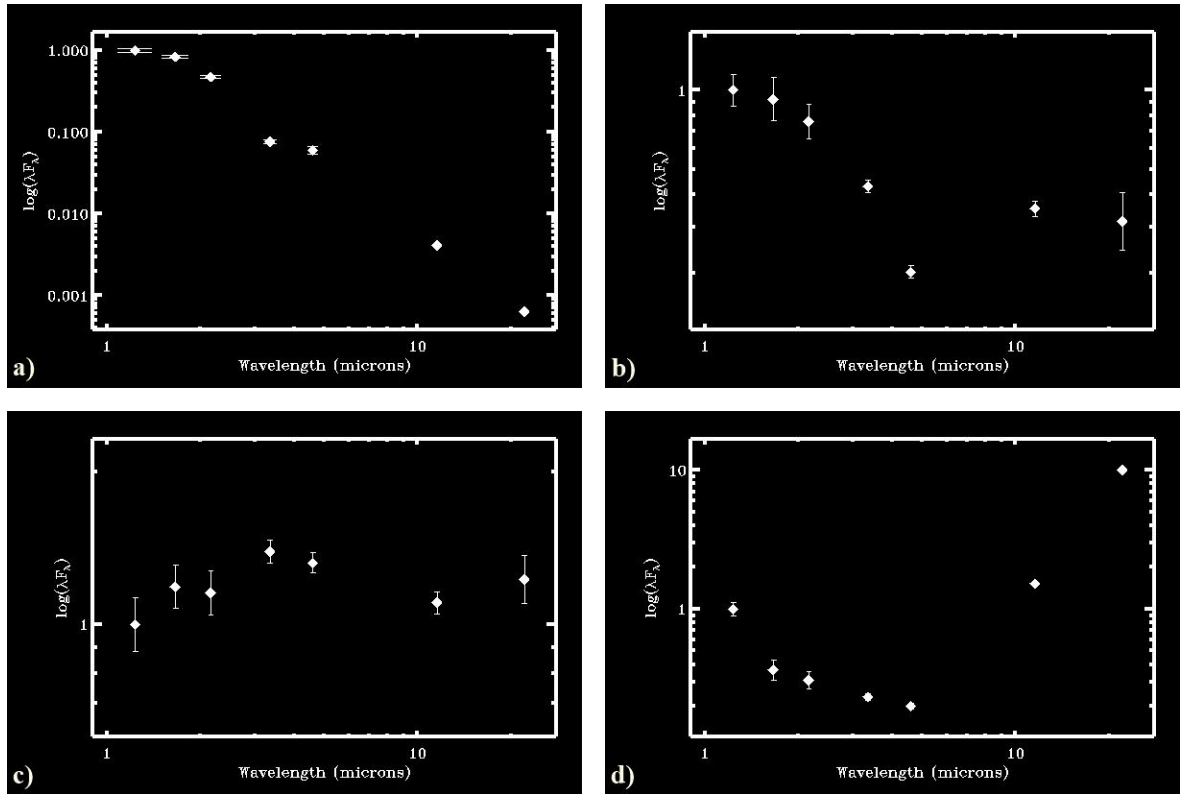
Kako zvijezde prikazane na Slikama 3.10 i 3.11 zrače određeni dio energije i u infracrvenom spektru, postoji vjerojatnost da u sustavu ovih zvijezda postoje debris diskovi. Dijagrami zvijezda koje sadrže YSO diskove općenito zrače više energije u infracrvenom spektru te će odgovarajuće točke dijagrama imati veću vrijednost količine izračene energije. Kako zvijezde s YSO diskovima u svom sustavu imaju veću količinu međuzvjezdane prašine, zbog raspršenja zračenja od čestice kozmičke prašine za većinu ovih zvijezda je količina izračene energije prikazane u SED dijagramu na valnoj duljini od jednog mikrona manja nego u SED dijagramima zvijezda s debris diskovima. SED dijagram zvijezda s YSO diskovima prikazan je na Slici 3.12.



Slika 3.12: SED dijagrami AWI0005b5p (lijevo) i AWI0005w96 (desno) zvijezda. Zvijezde su dobri kandidati za postojanje YSO diskova jer zrače veću količinu energije na većim valnim duljinama u odnosu na zvijezde s debris diskovima.

Na Slici 3.13 nalaze se primjeri SED dijagrama objekata koji nisu kandidati za postojanje debris i YSO diskova u svojoj okolini. Na Slici 3.13 a) prikazan je dijagram koji oblikom većinom podsjeća na zvijezdu koja bi mogla imati debris disk u svojoj okolini. Međutim, otprilike na 3 mikrona vidljivo je veliko odstupanje u gustoći zračenja zvijezde. Kako je pregledom slika objekata samo na slici WISE 1 istraživanja vidljiva velika

deformacija u obliku objekta, najvjerojatnije je odstupanje uzrokovano greškom prilikom snimanja. Na ostalim SED dijagramima nije vidljiv tipičan izgled krivulja koje se podudaraju s SED dijagramima zvijezda. Konkretno, na Slici 3.13 b) prikazana je galaksija, u slučaju c) kvazar, a na posljednjoj slici prikazan je SED dijagram planetarne nebule, objekata koji nisu važni za razmatranja *Disk Detective* projekta, budući da je riječ o oblacima plina i prašine koje su izbacili stari crveni divovi. SED dijagrami posebno su korisni kod kvazara i AGN objekata jer su različiti od SED dijagrama zvijezda, iako su slike tih objekata jako slične slikama zvijezda koje bi bile dobri kandidati za postojanje planetarnog sustava.



Slika 3.13: Primjeri SED dijagrama objekata i sustava koji nisu dobri kandidati za *Disk Detective* razmatranja. a) SED dijagram zvijezde AWI0005zgc, kod koje je primijećena velika deformacija u slikama WISE 1 istraživanja, b) SED dijagram galaksije AWI0000apd, c) SED dijagram kvazara AWI00000t3, d) SED dijagram planetarne nebule AWI00006ju.

Uz opciju prikaza SED dijagrama za svaki objekt, *Disk Detective Talk* omogućuje direktno provjeravanje informacija o objektu u SIMBAD bazi podataka. SIMBAD (engl. *Set of Identifications, Measurements, and Bibliography for Astronomical Data*) je baza podataka koju je kreirao i koju održava astronomski podatkovni centar u Francuskoj (*Centre de données astronomiques de Strasbourg*). Kada korisnik *Disk Detective* sustava odabere opciju za prikaz više podataka, SIMBAD bazi se prosljeđuju koordinate objekta, nakon čega baza traži regiju u blizini tog objekta. Ako je rezultat uspješan, SIMBAD prikazuje podatke o udaljenosti pronađenog objekta od prosljeđenih koordinata, spektralnu klasifikaciju,

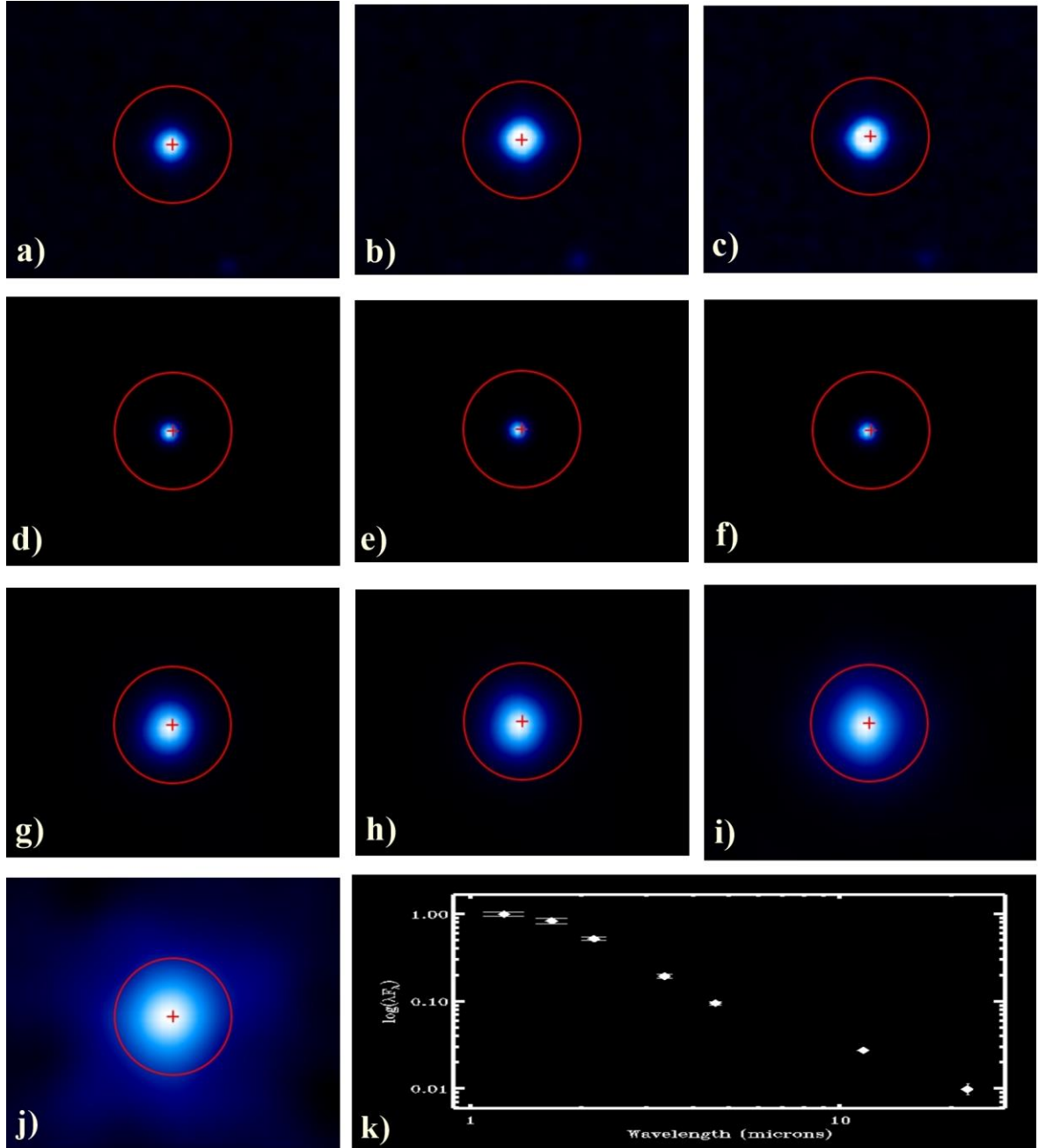
veličinu, reference u radovima znanstvenika i brojne druge informacije. Međutim, kako količina slika objekata brzo raste, a dobar dio njih nije klasificiran, dosta često se dogodi da se objekt ne nalazi u SIMBAD bazi. Upravo zato i služe projekti kao što je *Disk Detective*, čiji je cilj pomoć znanstvenicima u identifikaciji i klasifikaciji brojnih nebeskih objekata.

4. Rezultati rada na *Disk Detective* projektu

U ovom odjeljku prikazati ću rezultate klasifikacija potencijalnih kandidata za postojanje protoplanetarnih diskova, od 100 prikazanih objekata. U nastavku ću slikom i SED dijagramom prikazati zanimljivije slučajeve, a na koncu ću prikazati i postotak zvijezda koje bi mogle imati YSO ili debris diskove u svom sustavu u odnosu na ukupan broj prikazanih projekata, postotak ponavljanja pojedinačnih deformacija u ukupnom uzorku, kao i postotak zastupljenosti objekata u SIMBAD bazi, u odnosu na ukupan broj prikazanih objekata.

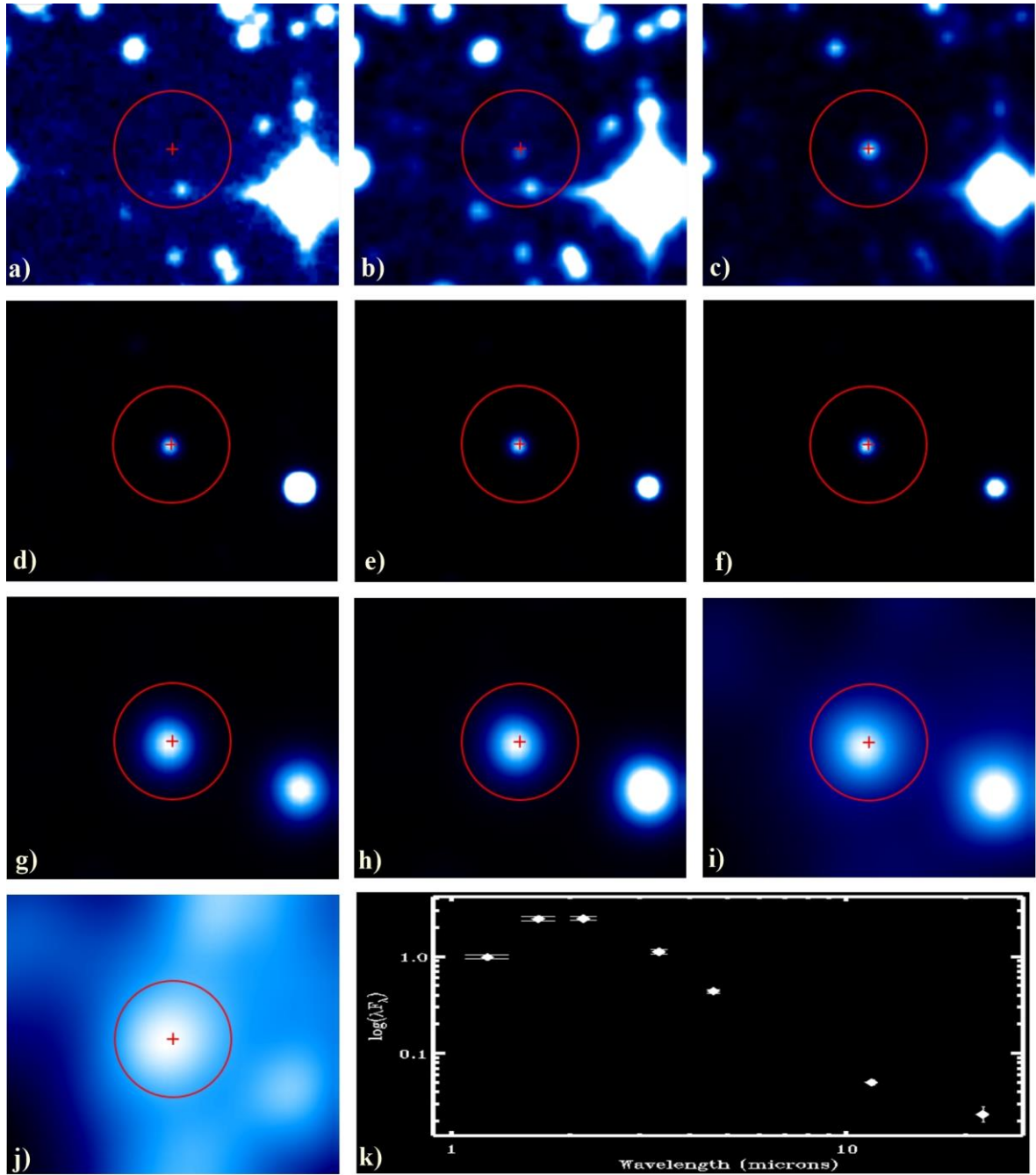
Na slikama u nastavku prikazane su pojedinačne slike zanimljivih objekata, slikanih svim dostupnim valnim duljinama pojedinih istraživanja, a nakon toga i SED dijagrami tih objekata. Na slikama a) do c) prikazane su slike objekata DSS2 Blue ($\lambda = 0.665 \mu\text{m}$), DSS2 Red ($\lambda = 0.975 \mu\text{m}$) i DSS2 IR ($\lambda = 1.15 \mu\text{m}$) istraživanja, respektivno. Potom su na slikama d) do f) prikazane slike 2MASS istraživanja, točnije 2MASS istraživanja u J ljosci ($\lambda = 1.24 \mu\text{m}$), H ljosci ($\lambda = 1.66 \mu\text{m}$) i K ljosci ($\lambda = 2.16 \mu\text{m}$), respektivno. Na posljednje četiri slike nalaze se rezultati WISE istraživanja. Konkretno, na slikama g) do j) prikazani su rezultati WISE 1 ($\lambda = 3.4 \mu\text{m}$), WISE 2 ($\lambda = 4.6 \mu\text{m}$), WISE 3 ($\lambda = 12 \mu\text{m}$) i WISE 4 ($\lambda = 22 \mu\text{m}$) istraživanja.

Na Slici 4.1 prikazan je objekt označen u *Disk Detective Talk* projektu kao AWI0005myt. Na slikama DSS2 i 2MASS istraživanja objekt je kružnog oblika, dok je na slikama WISE istraživanja samo na najvećoj valnoj duljini vidljiv sjaj izvan granica crvenog kruga. Na ostalim slikama WISE istraživanja, sjaj objekta ne izlazi iz crvenog kruga pa sam zaključila da ovaj uvjet nije narušen. Objekt ne odstupa od središnjeg križića i nisu vidljivi dodatni objekti unutar kruga. Kako objekt nije narušio niti jedan od kriterija postojanja protoplanetarnih diskova, klasificirala sam objekt kao zvijezdu s mogućnošću postojanja protoplanetarnih diskova. Pregledom SED dijagrama, vidljivo je da je najvjerojatnije riječ o zvijezdi koja u svom sustavu ima debris disk. Objekt se nalazi i u SIMBAD bazi, gdje je klasificiran samo kao „izvor infracrvenog zračenja“, što znači da nije isključena opcija da je ovaj objekt zvijezda s protoplanetarnim diskom.



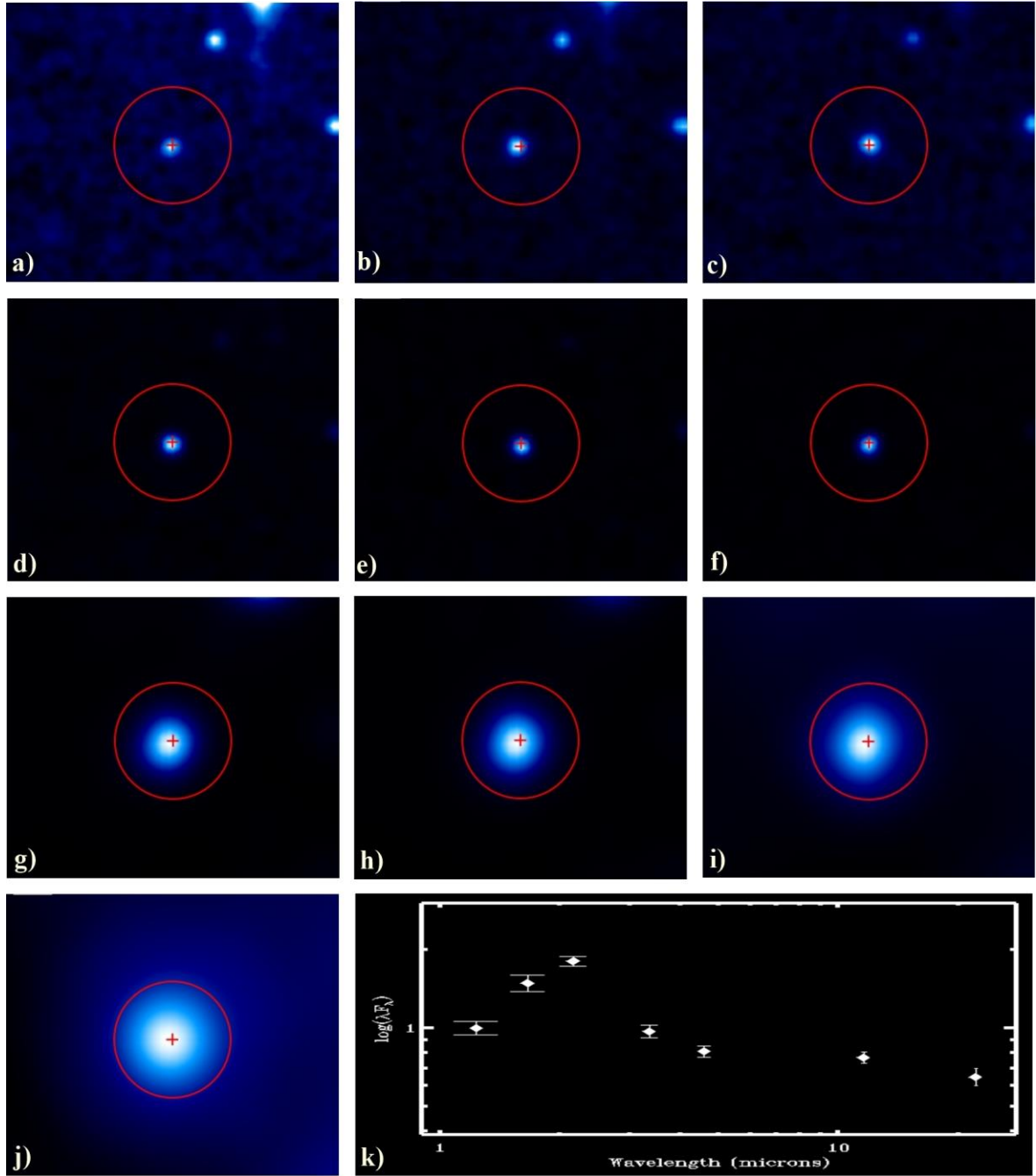
Slika 4.1: Slike i SED dijagram zvijezde AWI0005myt, koja je dobar kandidat za postojanje protoplanetarnih diskova.

Na Slici 4.2 prikazan je objekt AWI0002w3g, čiji SED dijagram bi mogao sugerirati zvijezdu s YSO diskom. Međutim, pregledom slika na raznim valnim duljinama vidljivo je nekoliko poteškoća. Prije svega, sve slike DSS2 istraživanja jasno prikazuju postojanje drugih objekata unutar crvenog kruga, dok se na WISE slikama jasno može vidjeti veliko odstupanje sjaja zvijezde na minimalno dvije valne duljine pa prema ova dva kriterija, objekt nije dobar kandidat za zvijezdu s protoplanetarnim diskovima. Objekt se ne nalazi u SIMBAD bazi podataka, a na relativno pravilan oblik SED dijagrama najvjerojatnije su utjecali drugi objekti koji se nalaze u blizini.



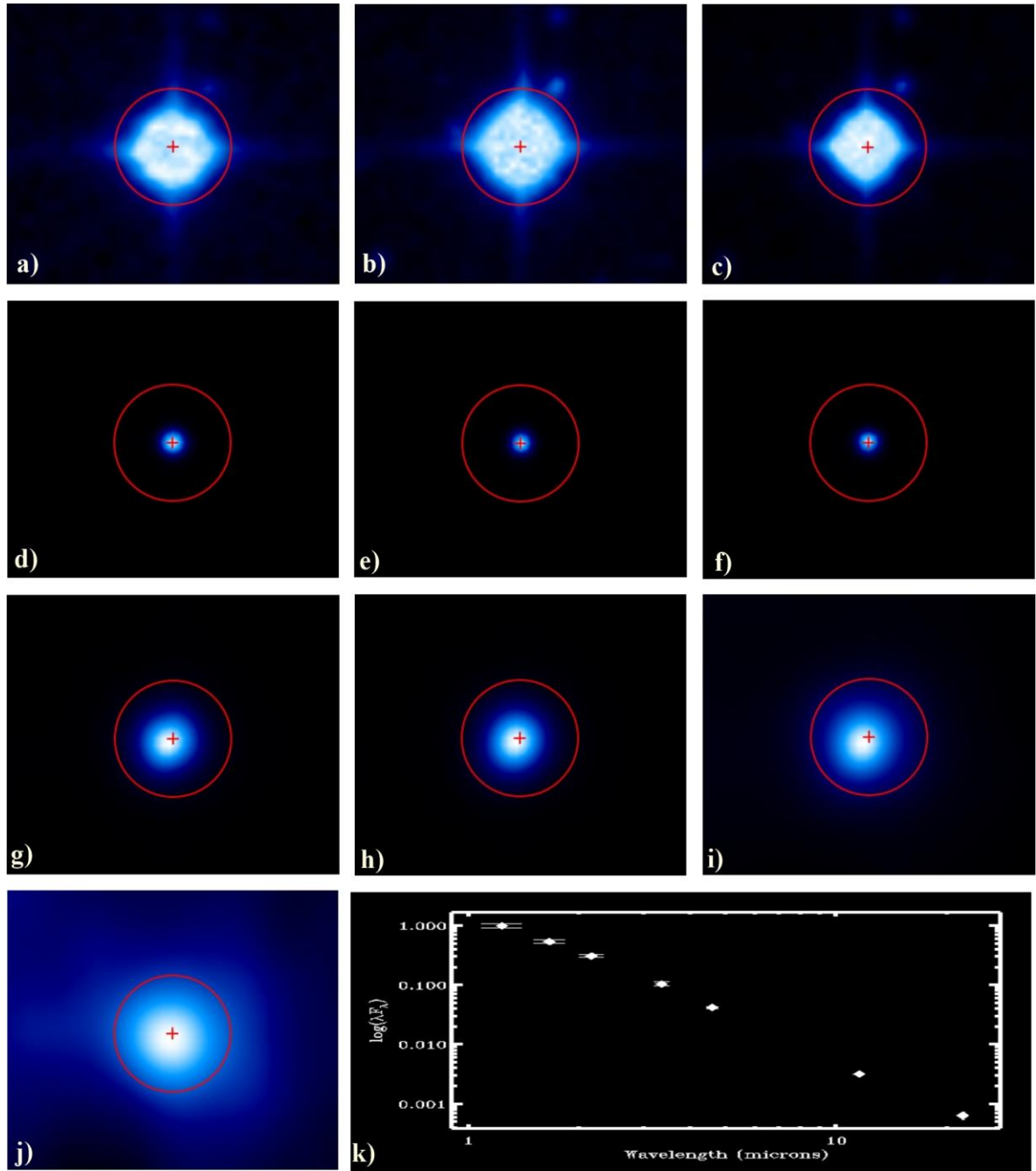
Slika 4.2: Slike i SED dijagram objekta AWI0002w3g, koji unatoč SED dijagramu nije dobar kandidat za zvijezdu s protoplanetarnim diskovima.

Zanimljiv primjer svakako je i objekt AWI0002vc3 (Slika 4.3). Tek pažljiviji promatrač može uočiti male odmake od središta kruga i sitne deformacije oblika, a sjaj zvijezde na slici WISE 3 istraživanja tek lagano prelazi granice kruga. Kada promatrač ne bi bio pažljiv, klasificirao bi objekt kao zvijezdu s debris ili YSO diskom. Međutim, pregledom SED dijagrama vidljivo je da objekt ne samo da nije dobar kandidat za postojanje planetarnog sustava, nego uopće nije zvijezda. S obzirom na izgled dijagrama, najvjerojatnije je riječ o aktivnoj galaksijskoj jezgri (AGN).



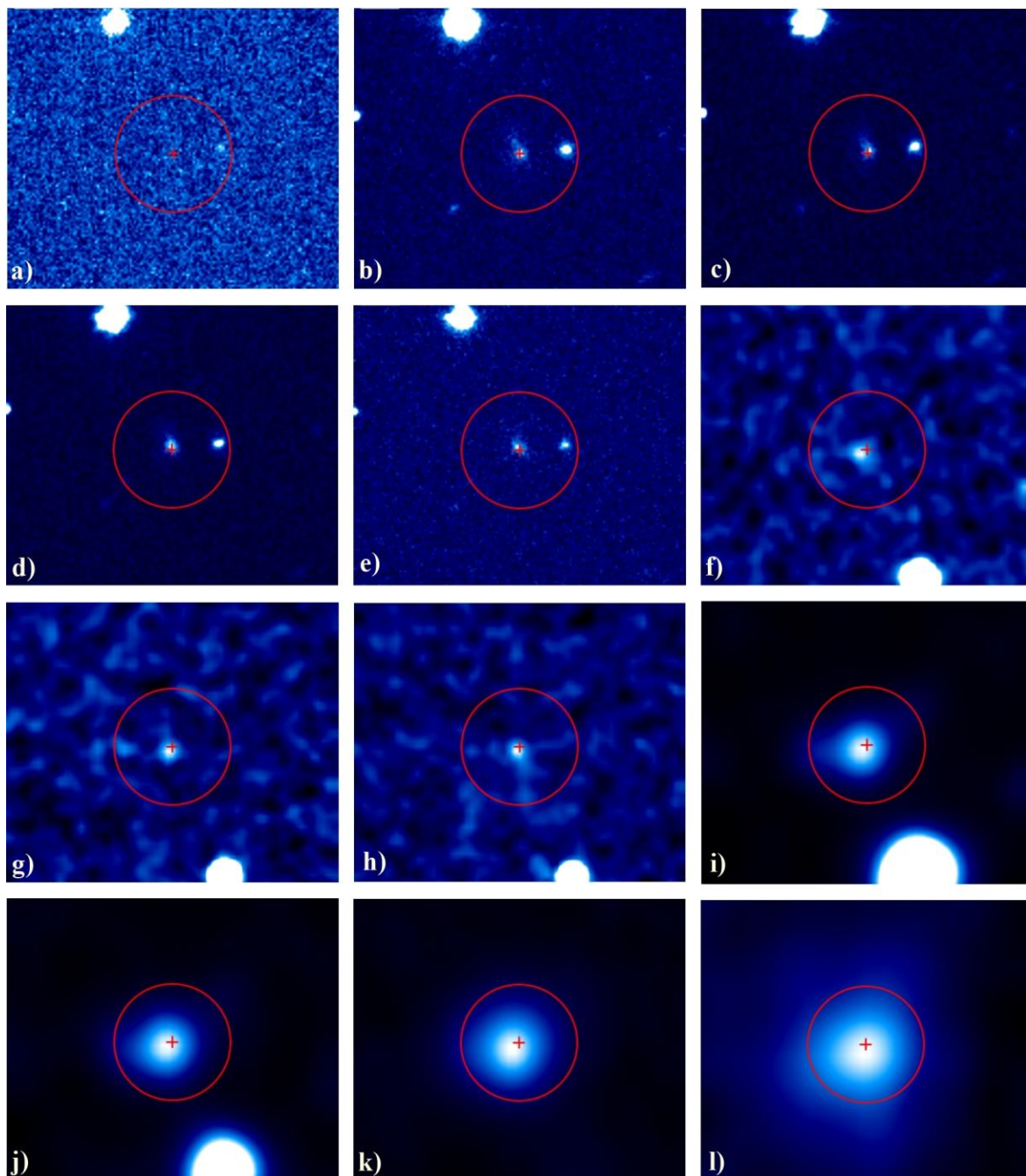
Slika 4.3: Slike i SED dijagram objekta AWI0002vc3, koji nije dobar kandidat za zvijezdu s YSO ili debris diskovima. Iako su odstupanja slabo primjetna na slikama pojedinih istraživanja, SED dijagram ukazuje na to da nije riječ o zvijezdi nego najvjerojatnije aktivnoj galaksijskoj jezgri.

Na Slici 4.4 nalazi se primjer utjecaja pogreški teleskopa na izgled objekata. Kako je samo na slikama DSS2 istraživanja vidljiv oblik zvijezde s krakovima, odnosno kako se ovaj fenomen ne pojavljuje u ostalim istraživanjima, zaključila sam da nije riječ o odstupanju u obliku zvijezde, nego je problem u teleskopu. SED dijagram jasno pokazuje da je riječ o mlađoj zvijezdi, koja bi mogla u svom sustavu imati debris disk. Objekt se nalazi i u SIMBAD bazi, klasificiran je kao zvijezda klase B0.

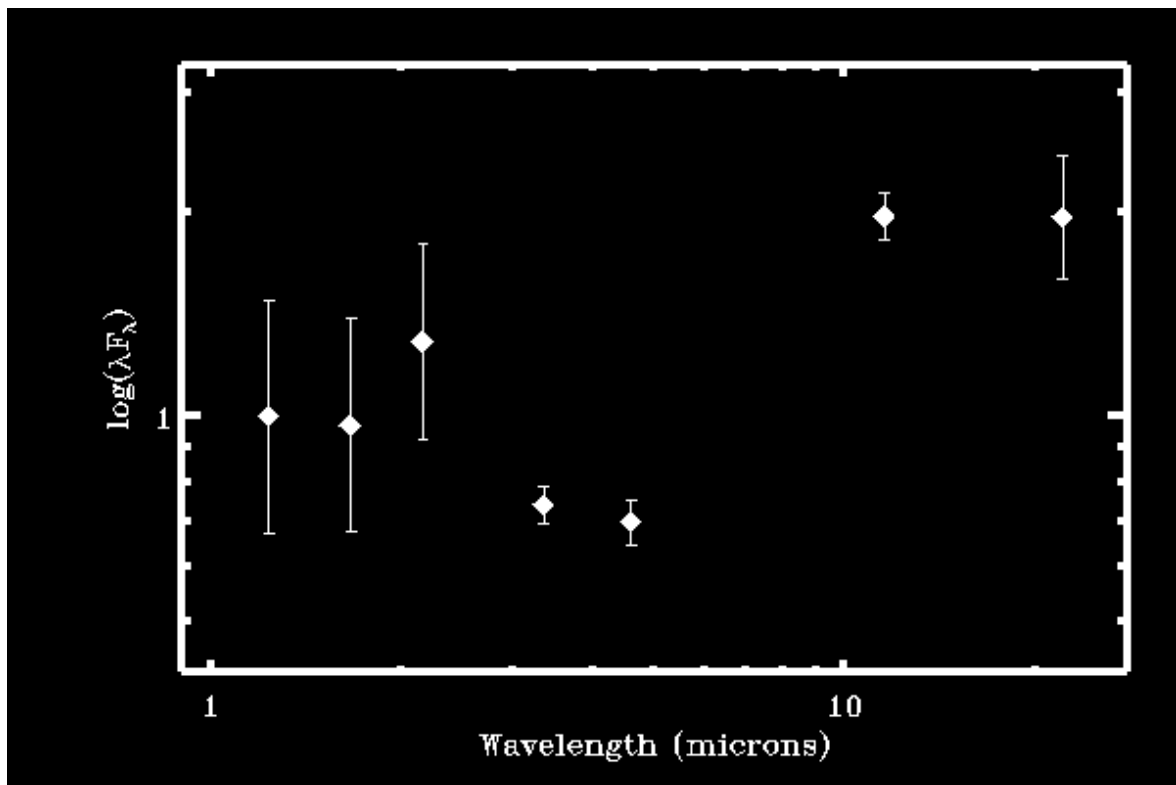


Slika 4.4: Slika objekta AWI0002v85, klasificirane B0 zvijezde koja je dobar kandidat za postojanje debris diska. Na slikama a) do c) vidljive su posljedice pogrešaka u optici teleskopa.

Na koncu, na Slici 4.5, prikazan je primjer objekta koji nije dobar kandidat iz nekoliko razloga. Prije svega, na gotovo svim slikama vidljivo je postojanje više objekata unutar crvenog kruga. Potom je na dobrom dijelu slika vidljivo da objekt nije kružnog oblika, a granicu crvenog kruga sjaj objekta prelazi na više od dvije slike WISE istraživanja. Ovo je također jedan od rjeđih primjera u kojima su korištene slike SDSS istraživanja. Pregledom SED dijagrama (Slika 4.6) može se zaključiti da je prikazani objekt najvjerojatnije galaksija.



Slika 4.5: Slike objekta AWI0000j40 koji nije dobar kandidat za zvijezdu s debris ili YSO diskovima. a) Slika SDSS U istraživanja ($\lambda = 0.359 \mu\text{m}$), b) Slika SDSS G istraživanja ($\lambda = 0.481 \mu\text{m}$), c) Slika SDSS R istraživanja ($\lambda = 0.623 \mu\text{m}$), d) Slika SDSS I istraživanja ($\lambda = 0.764 \mu\text{m}$), e) Slika SDSS Z istraživanja ($\lambda = 0.906 \mu\text{m}$), f) Slika 2MASS J istraživanja ($\lambda = 1.24 \mu\text{m}$), g) Slika 2MASS H istraživanja ($\lambda = 1.66 \mu\text{m}$), h) Slika 2MASS K istraživanja ($\lambda = 2.16 \mu\text{m}$), i) Slika WISE 1 istraživanja ($\lambda = 3.4 \mu\text{m}$), j) Slika WISE 2 istraživanja ($\lambda = 4.6 \mu\text{m}$), k) Slika WISE 3 istraživanja ($\lambda = 12 \mu\text{m}$), l) Slika WISE 4 istraživanja ($\lambda = 22 \mu\text{m}$).



Slika 4.6: SED dijagram objekta AWI0000j40. Prema gustoći toka energije u infracrvenom spektru može se zaključiti da je objekt od interesa galaksija.

Tijekom rada na *Disk Detective* projektu, za klasifikaciju objekata odabrala sam uzorak od 100 objekata. Prilikom klasifikacije objekata, pozornost sam obratila na zastupljenost pojedinih kriterija u klasifikaciji objekta kao lošeg kandidata za zvijezdu s YSO ili debris diskom. Najčešći kriterij kojeg objekti nisu ispunjavali je prelazak sjaja objekta izvan granica crvenog kruga u WISE istraživanjima, što se pojavilo u čak 75% slučajeva. Potom u 63% slučajeva objekti nisu bili kružnog oblika na minimalno dvije slike DSS2 i 2MASS istraživanja, a u 62% slučajeva pojavili su se dodatni objekti unutar kruga. Slučaj da se objekt odmicao od središta kruga dogodio se 33% puta, ali se zato slučaj praznog crvenog kruga u WISE slikama nije dogodio niti jedan put. Zanimljiva je činjenica da se od ukupnog broja objekata samo 11% objekata nalazilo u SIMBAD bazi. Od ukupnog broja objekata, samo 9% objekata klasificirala sam kao dobre kandidate za zvijezdu s YSO ili debris diskom.

Početkom 2015. godine, NASA je objavila da je *Disk Detective* projekt tada sadržavao slike 278 000 objekata, prikupljenih WISE istraživanjem. Od ukupnog broja, nakon usuglašenih klasifikacija koje su načinili volonteri te dodatnih pregleda od strane profesionalnih astronoma, samo 478 objekata klasificirani su kao dobri potencijalni kandidati za zvijezdu s protoplanetarnim diskovima, što čini 0.172 % od ukupnog broja

objekata. Ovih 478 potencijalnih kandidata proslijeđeno je velikim teleskopima i svemirskim letjelicama na detaljne preglede te je od 478 potencijalnih kandidata do sada potvrđeno 37 zvijezda za koje postoji velika vjerojatnost za postojanje planetarnih sustava. Procjenjuje se da će do 2018. godine baza podataka sadržavati oko 3 milijuna objekata, a znanstvenici se nadaju da će barem 1000 objekata biti klasificirano kao dobri kandidati za postojanje planetarnih sustava, što je otprilike 0.033% od ukupnog broja objekata.

Kako je broj klasifikacija rastao, primijetila sam da je postotak objekata koje bih klasificirala kao dobre kandidate značajno opadao, što pretpostavljam da je posljedica iskustva i razvijanja sposobnosti razlučivanja sitnih detalja. Prema tome, zaključujem da se sa iskustvom smanjuje postotak objekata koje sudionici *Disk Detective* projekta klasificiraju kao dobre potencijalne kandidate. Iako predstavljeni rezultat dosta odstupa od postotka objekata koji se šalju teleskopima na dodatne preglede, treba uzeti u obzir da ovi objekti nisu prošli cjelokupni postupak klasifikacije i analize. Uzimajući u obzir da će se objekti iz ovog istraživanja prikazati barem još nekoliko desetaka puta ostalim sudionicima te da će tek oni objekti koji su konsenzusom svih odgovora klasificirani kao dobri kandidati biti proslijeđeni profesionalnim znanstvenicima, pretpostavljam da će se postotak od 9% smanjiti barem za jedan red veličine nakon detaljnije analize znanstvenika. Prema tome, zaključujem da su rezultati rada na *Disk Detective* projektu u skladu s očekivanjima voditelja projekta.

5. Zaključak

Proučavanje kozmičke prašine, od pojedinačnih čestica do diskova, može pomoći u razumijevanju nastanka Zemlje i planeta Sunčevog sustava, drugih planetarnih sustava i ekstrasolarnih planeta, kometa, asteroida, zvijezda pa čak i porijeklu vode na planetima. Snimke neba na valnim duljinama iz različitih dijelova elektromagnetskog spektra i sa sve većom razlučivosti dokaz su napretka astronomije, tehnologije, znanosti i čovječanstva općenito. S napretkom znanosti i povećanjem količine podataka, raste broj otvorenih pitanja i teorija o procesima nastanka i evolucije Svemira i svemirskih tijela.

S druge strane, koliko god bili ponosni zbog napretka tehnologije i znanosti, možemo primijetiti i opadanje zanimanja za profesionalnu znanost u široj populaciji. Srećom, rastući problem nedostatka vremena i profesionalnih znanstvenika za analizu velike količine astronomskih donekle smanjuju volonteri astronomi. Svojim svakodnevnim radom, kratkotrajnim promatranjem, ili pak dugotrajnim snimanjem neba vlastitim teleskopima, analizom postojećih znanstvenih podataka, vizualnom klasifikacijom objekata, unaprjeđenjem podatkovnih modela s ciljem poboljšanja strojnog učenja te brojnim drugim aktivnostima, volonteri neizmjereno doprinose astronomiji i znanosti općenito. Istraživanja pokazuju da su strast prema astronomiji i želja za doprinosom znanosti osnovni motivi ovih pojedinaca. Iskra interesa za znanost i astronomiju, zapaljena u mlađem djetinjstvu, kod ovih pojedinaca još uvijek tinja. Na političkim strukturama, edukacijskom sektoru i društvu općenito ostaje zadaća opskrbe kisika koji bi tu istu iskru, tijekom razvoja pojedinca, mogao potpiriti u pravi znanstveni plamen.

Dodatak A Znanost za građanstvo u Europskoj Uniji

Prije 20. stoljeća znanosti su se često bavila takozvana gospoda znanstvenici, odnosno pojedinci koji su vršili znanstvena istraživanja, a koji nisu bili zaposlenici neke javne znanstvene ustanove. Ova istraživanja bila su financirana iz privatnog sektora, najčešće upravo od znanstvenika koji je vršio istraživanje. Najvjerojatnije je ovakav povijesni razvoj znanstvenih istraživanja, koji je trajao do sredine 20. stoljeća, uvelike utjecao na rigoroznije definicije pojma „znanost za građanstvo“, a prema kojima je znanost za građanstvo sudjelovanje volontera ili samofinancirajućih osoba u znanstvenim procesima. Ipak, koliko god ova definicija bila točna, zbog obujma aktivnosti građana u znanosti, ne može se smatrati potpunom. Iako je praksa sudjelovanja građana u znanosti dugotrajna, pojam znanost za građanstvo relativno je mlad pa tako još uvijek traju diskusije o definiciji [19, 20].

Uz definiciju koja je strogo vezana za monetarnu politiku istraživanja, u proteklih nekoliko desetljeća, a posebice početkom tisućljeća, pojavljuju se brojni pokušaji definiranja znanosti za građanstvo. Dobar dio ovih pokušaja uz definiciju samog pojma nastoji obuhvatiti i široki spektar aktivnosti kojima građani pridonose znanosti. S ciljem što boljeg shvaćanja ne samo pojma, već i značenja znanosti za građanstvo nastao je projekt *Socientize*, čiji je konzorcij u suradnji s Europskom Komisijom, u ožujku 2013., objavio dokument naziva „*Green Paper on Citizen Science: Citizen Science for Europe*“, odnosno zeleni papir o znanosti za građanstvo u Europi. Cilj koji se *Socientize* projektom i zelenim papirom želi postići je suradnja sudionika znanosti za građanstvo s predstavnicima politike Europske Unije, a u konačnici i utvrđivanje kulture konzultacija i dijaloga unutar Europske Unije [19].

Na osnovu brojnih diskusija stručnjaka iz različitih područja i podataka prikupljenih iz raznih izvora, zeleni papir sažima i kanalizira ključna pitanja koja se javljaju uz znanost za građanstvo. Prema planu *Socientize* projekta i Europske komisije, Zeleni papir potaknuo je diskusiju o definiciji pojma, području djelovanja, utjecaju, razvoju, održivosti, motivaciji sudionika, te pokretačima i preprekama za daljnji razvoj znanosti za građanstvo. Na osnovu brojnih diskusija i doprinosa s raznih strana, *Socientize* konzorcij u rujnu 2014. objavio je „*White Paper on Citizen Science for Europe*“, odnosno bijeli papir o znanosti za građanstvo u Europi, kojim se iznose preporuke za daljnje djelovanje institucijama, profesionalnim znanstvenicima i građanima koji žele sudjelovati u znanosti, kako na razini cijele Europe, tako i u lokalnim sredinama [20]. U nastavku ću iznijeti najčešća pitanja koja su se javljala

uz znanost za građanstvo, kao i preporuke koje su Europska Komisija i *Socientize* konzorcij predložili bijelim papirom.

Jedno od prvih pitanja koje se postavilo je sljedeće: treba li u Europskoj Uniji uopće postojati jedna službena definicija pojma znanost za građanstvo i ako treba, što bi sve definicija trebala obuhvaćati? Pitanje se svakako nameće ponajprije zbog postojanja raznih definicija pojma. Koliko god definicija o samofinancirajućim amaterima znanstvenicima bila točna, ipak ne govori mnogo o obujmu aktivnosti kojima građani doprinose znanosti. Pojedine definicije uključuju samo dio aktivnosti, poput onih definicija koje u znanost za građanstvo uključuju samo sakupljanje i analizu podataka. Ove definicije očito zanemaruju utjecaj razvoja računalne industrije i digitalnih tehnologija te doprinos volontera u ovom području. Naime, uz sakupljanje i analizu podataka za znanstvena istraživanja, moderni građani u znanosti kreiraju puno više. Danas dobar dio analize i klasifikacije podataka provode računala. Uspješnost pojedine operacije ovisi o dosta faktora, ali ponajprije o skupu tzv. zlatnih podataka, odnosno skupa podataka na osnovu kojeg računalo strojnim učenjem unaprjeđuje algoritme koje treba obavljati. Današnji, moderni građani koji uvelike pridonose znanosti upravo su dobrim dijelom informatički stručnjaci i razvojni inženjeri koji unaprjeđivanjem računalnih algoritama i modeliranjem skupova podataka uvelike pridonose bržem i učinkovitijem napretku znanosti. Prema tome, definirati građane u znanosti kao grupu ljudi čije su osnovne aktivnosti sakupljanje i analiza podataka bila bi, u najmanju ruku, nedostatna definicija. S druge strane, pojedine definicije uključuju jako širok spektar aktivnosti, poput postavljanja pitanja, formulacije hipoteza i interpretacije rezultata. Neki autori idu tako daleko da uključuju i načine sastavljanja timova volontera i amatera koji bi radili na određenim istraživanjima, a ujedno debatiraju i sam pojam volontera. Na koncu je zelenim papirom zaključeno da ne postoji univerzalna definicija pojma znanost za građanstvo [19].

U lipnju 2014. godine, pojam „znanost za građanstvo“ uvršten je u Oksfordski rječnik engleskog jezika, u kojem je opisan kao „znanstveni rad poduzet od strane članova javnosti, često u suradnji ili pod vodstvom profesionalnih znanstvenika i znanstvenih institucija“.

U rujnu 2014. godine, konačnim dokumentom *Socientize* projekta iznesena je sljedeća definicija pojma: „Znanost za građanstvo odnosi se na uključenost javnosti u aktivnosti znanstvenih istraživanja kada građani aktivno doprinose znanosti, intelektualnim naporima, znanjem, ili svojim alatima i resursima“ [20]. Iako su čak i u ova dva slučaja autori različito

pristupili definicijama samog pojma, točnost definicija je neupitna. Prema tome, smatram da se može zaključiti da Europi, a u konačnici i samom čovječanstvu, nije prijeko potrebna definicija pojma. Daleko važniji je utjecaj sudjelovanja građana u znanosti na tijek i rezultate znanstvenih istraživanja, poticanje znanstvenog načina razmišljanja, unaprjeđenja infrastrukture, poticanje dijeljenja resursa te u konačnici i na kulturu općenito. Upravo zbog važnosti građana u znanosti, *Socientize* projekt i Europska Komisija Zelenim papirom potaknuli su diskusiju o motivaciji sudionika, pokretačima za aktivno sudjelovanje, načinima razvoja i održivosti različitih modela te preprekama na putu razvoja. Bijelim papirom predstavljaju se konkretni prijedlozi mjera kojima se može osigurati razvoj i održivost znanosti za građanstvo u Europi.

A.1. Otvorena pitanja

Posljednjih 30 godina svijet svjedoči vrlo brzim promjenama u svim sferama života čiji su uzrok, dakako, informacijsko-komunikacijske tehnologije. Pojava mrežnih sustava dostupnih svima, ali i razvoj društvenih mreža doprinijeli su povećanoj komunikaciji i razmjeni podataka. Pozitivni doprinosi najbrže rastuće industrijske grane znanosti za građanstvo veliki su, od prethodno spomenutih poboljšanja algoritama i unaprjeđenja strojnog učenja do češće komunikacije između znanstvenika i volontera. Međutim, brzi rast tehnologije donio je sa sobom i izuzetno velike količine podataka, koje je potrebno analizirati, razvrstati, klasificirati. U svrhu rješavanja „problema velikih podataka“ (engl. *Big data*), svakodnevno veliki timovi računalnih stručnjaka nastoje razvijati i unaprjeđivati algoritme za modeliranje podataka. Sa sve bržim razvojem, potrebno je i veće znanje studenata koji izlaze s fakulteta, a sukladno tome potreban je i izuzetno brzi razvoj edukacijskog sustava koji bi pratio promjene u znanosti.

Jedno od velikih otvorenih pitanja, razumijevanje kojeg je ključno za održivost znanosti za građanstvo, svakako je pitanje motivacije građana koji se odluče sudjelovati u znanstvenim procesima. Kroz brojne projekte se pokazalo da veliki broj građana već na prvom istraživanju odustane od sudjelovanja u znanosti. Izuzetno mali postotak sudionika se odluči za daljnje sudjelovanje. Zato je potrebno razumjeti što motivira upravo takve pojedince na ulaganje slobodnog vremena, vještina, znanja, računalnih resursa i truda u znanstvene svrhe. Složenost ovog pitanja povećava i široki spektar mogućih motiva za

aktivno sudjelovanje u znanosti. Pojedine sudionike motivira sama uključenost u znanstveni proces ili doprinos lokalnoj zajednici, a poneke sudionike motivira novac [1].

Kako dobar dio znanstvenih istraživanja ipak ne isplaćuje volontere koji u njemu sudjeluju, najvrjedniji su upravo oni sudionici koji su motivirani zanimanjem za znanstvenu temu u kojoj sudjeluju, ali i osjećajem zadovoljstva zbog doprinosa napretku znanosti. Srećom, istraživanja su pokazala da veliku većinu dugotrajno aktivnih sudionika čine upravo pojedinci čiji su motivi zanimanje za znanost [19]. S druge strane, postoje znanstvena istraživanja kojima je potreban veliki broj volontera koji će kratkotrajno sudjelovati u istraživanju. U ovakvim slučajevima potrebno je osmisliti niz motiva kojima bi se privukao veliki broj ljudi, ali i motivi koji bi dobar dio tih sudionika zadržali do kraja istraživanja. Neki od pokušaja motivacije građana za sudjelovanje u znanosti su priznanje od strane zajednice, natjecateljski elementi u istraživanjima, kao i povremeni poticaji poput sastanaka ili posebnih prostorija namijenjenih upravo za građane u znanosti.

Otvoreno ostaje i pitanje: kako motivirati profesionalne znanstvenike na sudjelovanje u projektima znanosti za građanstvo? Prepreke uspješnoj suradnji znanstvenika i amatera mogu biti razlike u praksama, značenjima, kompetencijama u određenim poljima, međusobnom uvažavanju, a u nekim situacijama i prestižu [19]. Pokazalo se da u dijelu znanstvenih ustanova među znanstvenicima vladaju nevjerica i skepticizam prema suradnji s građanima. Znanstvenicima bi svakako trebalo ukazati na prednosti suradnje s građanima, poput učinkovitijeg iskorištavanja podataka, resursa i vremena, pristupa novim podacima, kao i mogućnostima za vanjska financiranja od strane građana.

I na koncu ostaje pitanje mjerljivosti učinka i vrijednosti znanosti za građanstvo. U srži svih projekata znanosti za građanstvo je znanstveni napredak. Međutim, dodatne vrijednosti poput osobnog napretka sudionika, utjecaja na lokalne zajednice, kao i korist za obrazovanje, proizlaze iz manjeg dijela projekata pojedinačno, što mjerenje ukupnog učinka znanstvenih projekata u kojima sudjeluju građani čini složenim. Nadalje, postavlja se pitanje je li uopće moguće postaviti neke univerzalno mjerljive kriterije za sve projekte znanosti za građanstvo diljem Europe te ako je moguće, tko bi trebao biti odgovoran za kreiranje tih mjera. Ipak, izuzetno je komplicirano balansirano izmjeriti ukupne učinke koje sudjelovanje volontera u istraživanjima ima na znanost, društvo i obrazovanje.

A.2. Europska budućnost znanosti za građanstvo

Socientize konzorcij u dokumentu „*White Paper on Citizen Science in Europe*“ predlaže radnje i buduće mjere koji bi trebali osigurati razvoj i održivost znanosti za građanstvo u Europi. Dokument je nastao kao rezultat dugotrajnih diskusija o otvorenim pitanjima predstavljenima u zelenom papiru, a u procesu kreiranja konačnog dokumenta sudjelovali su svi dijelovi društva, od građana, preko profesionalnih znanstvenika, do političara. Diskusijom su se iskristalizirali određeni elementi koji mogu značajno utjecati na razvoj znanosti za građanstvo: edukacija, tehnologija, evaluacija i procjena učinka te pravo pristupa podacima. *Socientize* konzorcij predstavlja ciljeve i predložene mjere kroz tri razine djelovanja. „Makro–razina“ podrazumijeva stvaratelje regionalnih i nacionalnih politika, „mezo–razina“ podrazumijeva posrednike znanosti za građanstvo, dok „mikro–razina“ uključuje individualne sudionike istraživanja, profesionalne znanstvenike i građane koji sudjeluju u znanstvenom istraživanju.

Glavne zadaće makro–razine trebale bi biti dizajniranje i realiziranje novih, ciljanih sustava financiranja koji bi uključivali nove programe, specifične za znanost za građanstvo. Dodatno, regionalne i nacionalne politike trebale bi uključiti znanost za građanstvo u postojeće financijske programe. S ciljem povećavanja motivacije profesionalnih znanstvenika za suradnju s građanima, trebala bi se razviti kultura novih kriterija uspješnosti pojedinog znanstvenika, gdje bi uz postojeća priznanja znanstvenike više cijenilo kada bi u svoje projekte pomalo uključivali i elemente znanosti za građanstvo, potrebe javnosti i slično.

Jedan od ciljeva mezo–razine, odnosno organizatora i nositelja projekata znanosti za građanstvo prije svega bi bila identifikacija postojećih inicijativa, poput već financiranih programa, istraživačkih grupa i otvorenih laboratorija. Potom bi organizatori trebali poticati dijeljenje osoblja, metodologija, infrastrukture i ostalih resursa kako bi se osigurala i unaprijedila održivost projekata. Predlaže se i uključivanje javnosti u proces donošenja političkih smjernica daljnjeg razvoja znanosti za građanstvo, čime bi se javnost mogla bolje upoznati s ciljevima i vrijednostima koje se očekuju od projekata znanosti za građanstvo. Političari tada mogu „iz prve ruke“ saznati koje mjere u praksi funkcioniraju i na temelju toga graditi buduće smjernice razvoja. Zajedno bi ova suradnja i komunikacija javnosti i vladajućih struktura doprinijela gradnji dinamičnih i međusobno uključujućih zajednica. Jedna od ambicioznijih mjera svakako je i integracija istraživanja od strane građana u

institute, sveučilišta i druge znanstvene ustanove. Svrha ovakvih istraživanja, koja bi u potpunosti izvodili građani (uz eventualno mentorstvo profesionalnih znanstvenika), za cilj bi imala povezivanje javnosti i znanstvenika te otvaranje znanstvenih projekata javnosti, što bi u konačnici moglo dovesti do povećanog broja investicija iz privatnog sektora u znanstvene projekte.

Uz postavljanje očekivanih ciljeva za osiguravanje napretka znanosti za građanstvo, dokument predlaže i određene mjere kojima bi se moglo ispuniti ciljeve. U nastavku ću prikazati kategorije za koje su postavljeni ovi ciljevi, kao i predložene mjere koje bi pojedine razine unutar određene kategorije mogle provesti.

A.2.1. Edukacija

Poticanje dugotrajnije suradnje između škola i znanstvenih zajednica moglo bi doprinijeti spoznavanju potrebe za cjeloživotnim učenjem, unaprjeđenjem znanosti i društva. Makro-razina može potaknuti ovu suradnju unaprjeđenjem postojećih obrazovnih programa, primjerice promoviranjem projekata znanosti za građanstvo u školama, upoznavanjem učenika i studenata s novim oblicima sudjelovanja u zajednici i slično. Ključna mjera koju makro-razina treba uspostaviti svakako je osiguravanje veće fleksibilnosti kurikulumu, posebice informatičkih predmeta, kako bi nastavni program što bolje mogao ići u korak s brzim napretkom informacijsko-komunikacijskih i ostalih znanosti. Naravno, u određenim dijelovima Europske Unije uvijek ostaju otvorena pitanja bolje opremljenosti škola znanstvenim pomagalicama, osiguravanja cjeloživotnog učenja i edukacija za nastavnike kako bi zanimljivosti iz modernih znanosti mogli prenijeti učenicima i slično.

Posrednici znanosti za građanstvo svakako bi trebali kreirati ili pomoći u kreiranju obrazovnog plana koji će sadržavati osnovne temelje znanosti za građanstvo, a koji bi uključivao i sve faze cjeloživotnog učenja. Kreiranjem obrazovnih strategija, edukatorima znanosti za građanstvo izuzetno bi se olakšalo predstavljanje ključnih ideja, poput znanstvenih procedura, tehničkih pitanja, upravljanja zajednicom, metodologije učenja. Preporučuje se i izrada strategija za obrazovanje pripadnika makro-razine, odnosno donositelja odluka o smjernicama napretka znanosti za građanstvo.

Suradnja znanstvenika i sudionika znanosti za građanstvo s učiteljima i profesorima svakako bi mogla doprinijeti kvaliteti obrazovanja djece, popularizaciji znanosti za građanstvo te stvaranju važnih poznanstava koje bi profesori i učenici kasnije mogli iskoristiti.

A.2.2. Tehnologije

Neupitna je potreba korištenja brojnih tehnologija u znanosti za građanstvo, kao i prednosti koje one donose. Međutim, iako je Europa tehnološki jako razvijena, ipak postoje dijelovi kontinenta u kojima je pristup tehnologiji otežan. Prema tome, jedan od glavnih ciljeva znanosti za građanstvo treba biti olakšavanje pristupa tehnologijama, a dodatno bi pojedine postojeće sustave trebalo unaprijediti ili olakšati uporabu sustava krajnjim korisnicima. Ovi ciljevi zadaća su makro-razine, budući da ukidanje digitalnih barijera počinje upravo od političara, izvršitelja vlasti i stvaratelja državnog proračuna.

Mezo-razina svakako bi bila odgovorna za prikupljanje postojećih tehnologija i resursa. Pri tome treba imati na umu da bi postojeće, ali i nove tehnologije trebale biti jednostavne za korištenje, treba im se moći lako pristupiti i trebalo bi ih se moći relativno jednostavno unaprijediti. Također, potrebno je osigurati odgovarajuću podršku za nove i postojeće tehnologije.

Kako se dobar dio znanosti za građanstvo odvija *online*, voditelji projekata znanosti za građanstvo trebali bi moći osigurati sudionicima projekata odgovarajuću platformu na kojoj svi mogu kvalitetno surađivati. Preporučuje se komunikacija između voditelja projekata i razvojnih inženjera odmah na početku izrade projekata kako bi se platforme što bolje dizajnirale i prilagodile potrebama projekta.

A.2.3. Evaluacija i procjena

S ciljem priznavanja znanstvenika koji sudjeluju u istraživanjima zajedno s građanima, ali i dodatnog motiviranja istraživača za sudjelovanje u istima, na razini politike i izvršne vlasti preporučuje se prilagodba metrike uspješnosti i poticaja znanstvenicima u postojećim znanstvenim kurikulumima. Jedna od predloženih mjera je prednost pri dodjeli sredstava za

istraživanje onim projektima koji imaju veći društveni učinak ili pak veću uključenost građana u projekt.

Kako bi ovaj model uopće mogao zaživjeti, potrebno je dobro definirati kriterije mjerenja koji bi procijenili utjecaj postignut na različitim razinama. Dobro definirani kriteriji ocjenjivanja doprinijeli bi uvelike procjeni uspješnosti samog projekta, a potom i promicanju rezultata i učinaka znanosti za građanstvo u široj populaciji. Svaka evaluacija trebala bi sadržavati povratne informacije od svih sudionika, a veća promocija i naglašavanje uspješnosti može povećati i broj investicija u projekte. Kako se ovo područje konstantno razvija, a primjenjivo je u brojnim sferama društva, mezo-razina ne može kreirati standardizirana mjerila koja bi bila primjenjiva u svim projektima znanosti za građanstvo. Ono što bi sudionicima istraživanja moglo koristiti su metrika i pokazatelji dobrih praksi. Za mikro-razinu se dodatno preporučuje i uključivanje mišljenja javnosti u proces evaluacije projekata.

A.2.4. Podaci

O pristupu, dijeljenju, zaštiti i općenito o podacima postoji mnogo otvorenih pitanja. Već dugo vremena sve razine zagovaraju otvorenost podataka, algoritama, alata i tehnologija općenito, poštujući pritom prava intelektualnog vlasništva, fundamentalna prava pojedinca na zaštitu osobnih podataka, etičke standarde i kvalitetu znanstvenih podataka.

Makro-razina svakako može pridonijeti olakšanom pristupu podacima tako što će donijeti jasne etičke smjernice o politici pristupa i sigurnosti podataka na razini cijele Europske Unije. Mezo-razina dodatno može doprinijeti tako što će težiti stvaranju centraliziranih baza podataka, dok mikro-razina može osigurati kvalitetu podataka.

Literatura

- [1] Marshall, P. J.; Lintott, C. J. ; Fletcher, L.N., Ideas for Citizen Science in Astronomy // *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*. Vol. 53 (2015), str. 247-278
- [2] Richards, J., Galaxy Zoo: A Zooniverse Project Blog, (kolovoz 2012), <http://www.galaxyzoo.org>, 22.12.2015.
- [3] Bilalbegović, G., Molekule, kristali i amorfni materijali u Svemiru // *Matematičko-fizički list*, svez. LXIV, br. 1 (2013-2014), str. 44-49.
- [4] Burke, D. J.; Brown, W.A., Ice in space: surface science investigations of the thermal desorption of model interstellar ices on dust grain analogue surfaces // *Physical Chemistry Chemical Physics*, svez. XII, br. 23 (2010), str. 5929-6292.
- [5] Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology (n.d.), *Cassini Solstice Mission*, <http://saturn.jpl.nasa.gov/spacecraft/cassiniorbiterinstruments/instrumentsscassinicda/>, 6.1.2016.
- [6] Espy, A.; Graps, A., Interplanetary Dust // *Community White Paper to the Planetary Science Decadal Survey*, 2011.
- [7] Bouwman, J.; Meyer, M. R.; Serena Kim, J.; Silverstone, M. D.; Carpenter, J. M.; Hines, D. C., The Formation and Evolution of Planetary Systems: placing our Solar System in context // *Planet Formation: Theory, Observations, and Experiments*, Cambridge University Press, 2006., str. 14-25.
- [8] Williams, J. P.; Cieza, L. A., Protoplanetary Disks and Their Evolution // *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*. Vol. 49 (2011), str. 67-117.
- [9] Birnstiel, T.; Windmark, F.; Dullemond, C. P.; Klahr, H., Growth and Transport of Dust Grains - How to Cross the Meter Size Barrier // *Workshop on Formation of the First Solids in the Solar System*, Kauai: Lunar and Planetary Institute, studeni 2011.
- [10] Raymond, S. N.; Armitage, P. J.; Moro-Martin, A.; Booth, M.; Wyatt, M. C.; Armstrong, J. C.; Mandell, A. M.; Selsis, F.; West, A. A., Debris disks as signposts of terrestrial planet formation // *Astronomy and Astrophysics*, vol. 530 (12.5.2011), <http://www.aanda.org/articles/aa/abs/2011/06/aa16456-11/aa16456-11.html> , 20.12.2015.
- [11] Jacobson, S. A.; Walsh, K. J., Earth and Terrestrial Planet Formation // *The Early Earth: Accretion and Differentiation* / Uredili: Badro J. i Walter M. . Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2015, str. 49-70.

- [12] Helled, R.; Bodenheimer, P.; Podolak, M.; Boley, A.; Meru, F.; Nayakshin, S.; Fortney, J.J.; Mayer, L.; Alibert, Y.; Boss, A.P., *Giant Planet Formation, Evolution, and Internal Structure // Protostars and Planets VI*, University of Arizona Press, 2014, str. 643-665.
- [13] Sloan Digital Sky Survey: Mapping the Universe, (1.4.2014), <http://classic.sdss.org/>, 9.1.2016.
- [14] Sloan Digital Sky Survey III, (2013), <http://www.sdss3.org>, 9.1.2016.
- [15] National Aeronautics and Space Administration, (10.12.2009), *Barbara A. Mikulski Archive for Space Telescopes*, <http://archive.stsci.edu/dss>, 10.1.2016.
- [16] Infrared Processing and Analysis Center, (13.12.2006), *The Two Micron All Sky Survey at IPAC*, <http://www.ipac.caltech.edu/2mass/>, 10.1.2016.
- [17] National Aeronautics and Space Administration; Infrared Processing and Analysis Center, (3.11.2015), *Infrared Science Archive*, <http://irsa.ipac.caltech.edu/Missions/2mass.html>, 11.1.2016.
- [18] National Aeronautics and Space Administration, (12.1.2010), *WISE: Wide-field Infrared Survey Explorer*, <http://wise.ssl.berkeley.edu/mission.html>, 11.1.2016.
- [19] European Commission (21.1.2014), *Green Paper on Citizen Science for Europe*, <https://ec.europa.eu/digital-agenda/en/news/green-paper-citizen-science-europe-towards-society-empowered-citizens-and-enhanced-research-0>, 15.12.2015.
- [20] Societize Citizen Science Projects (11.9.2015), *White Paper on Citizen Science for Europe*, <http://societize.eu/?q=eu/content/download-societize-white-paper>, 20.12.2015.