

UNIVERZITET U BEOGRADU
MATEMATIČKI FAKULTET
Katedra za astronomiju



MOGUĆNOST DETEKCIJE MALIH
MEĐUZVEZDANIH TELA PRILIKOM
PROLASKA KROZ SUNČEV SISTEM

Miljan Kolčić

Master rad

· Beograd, 2019 ·

Sažetak

Već duže vreme postoje hipoteze o postojanju međuzvezdanih objekata koji prolaze kroz Sunčev sistem. Pretpostavlja se da predstavljaju planetezimale nastale u blizini zvezda naše galaksije, koji su izbačeni u međuzvezdani prostor dinamičkim mehanizmima karakterističnim za evoluciju planetarnih sistema. Nakon otkrića prvog objekta ovog tipa tokom 2017. godine proučavanje međuzvezdanih objekata naglo dobija na značaju i aktuelnosti. U radu koji sledi modelovana je populacija međuzvezdanih objekata. Zatim je diskutovana mogućnost za detekciju i posmatranje malih međuzvezdanih tela koja prolaze kroz Sunčev sistem pomoću postojećih i budućih pretraga neba kao što su: Pan-STARRS, ZTF, LSST. Pored toga ispitano je kako različiti parametri generisane populacije međuzvezdanih objekata poput raspodele po veličinama (*size-frequency distribution*) utiču na broj objekata koji bi mogli biti detektovani i izdvojene su karakteristike simulacijom detektovanih objekata, kao što su orbitalne karakteristike i prvidine brzine budući da one imaju veoma veliki značaj za mogućnost otkrivanja novih objekata.

Sadržaj

Nomenklatura	1
1 Uvod	2
2 Međuzvezdani objekti	6
3 Hiperboličke orbite	11
4 Modelovanje populacije međuzvezdanih objekata	15
4.1 Prostorna gustina i veličine objekata	15
4.2 Orbite objekata	17
5 Sintetički model Sunčevog sistema	22
6 Prividne karakteristike međuzvezdanih objekata i malih tela Sunčevog sistema	29
7 Analiza i rezultati	33
8 Zaključak	42
Reference	44

Nomenklatura

Oznaka	Značenje
a	velika poluosa
b	mala poluosa
e	ekscentricitet
f	fazni ugao
i	inklinacija
n	srednje kretanje
p	parametar elipse
p_v	albedo
r_g	geocentrična daljina
r_h	heliocentrična daljina
v_∞	hiperbolički višak brzine
q	perihelsko rastojanje
E	hiperbolička anomalija
H	apsolutna magnituda
T	period rotacije
β	ekliptička latituda
λ	ekliptička longituda
μ	gravitacioni parametar
ν	prava anomalija
Ω	longituda uzlaznog čvora

Glava 1

Uvod

Potruga za malim telima Sunčevog sistema datira još od 1772. godine kada je Bode (Johann Elert Bode) sugerisao da postoji mogućnost postojanja planete koja do tada nije bila otkrivena, a koja bi trebalo da se nalazi između orbita Marsa i Jupitera. Ovu prazninu između orbita dveju planeta primetio je i Kepler 1596. godine. Nakon što je Vilijem Heršel (Sir William Herschel) otkrio planetu Uran 1781. godine i odredio joj orbitu, utvrđeno je da se novootkrivena planeta nalazi na rastojanju od Sunca predviđenim Ticijus-Bodeovom progresijom. Ovaj pronalazak osnažio je potvrdu u ispravnost Ticijus-Bodeove progresije, koja predstavlja hipotezu da rastojanja planeta od Sunca odgovaraju progresiji (0,4 0,7 1,0 1,6 2,8 5,2 10,0 19,6 38,8). Krajem osamnaestoga veka, baron Franc Ksaver (Franz Xaver von Zach) organizovao je grupu iskusnih astronoma kako bi tragali za neotkrivenom planetom. Planeta za kojom se tragalo, sudeći po Ticijus-Bodeovoj progresiji, trebalo je da se nalazi na rastojanju od 2,8 astronomskih jedinica od Sunca. Hipotetička planeta, odnosno danas već dobro poznati asteroid 1 Ceres nije pronađen od strane organizovane grupe, već ju je slučajno otkrio Đuzepe Piaci (Giuseppe Piazzi) tadašnji direktor opservatorije Palermo sa Sicilije 1801. godine. Sledeća tri asteroida 2 Palas, 3 Junona (Juno) i 4 Vesta otkrivena su do 1807. U godinama koje su usledile, nakon neuspeha u otkrivanju novih objekata, potraga za asteroidima izgubila je na intenzitetu.

Razvoj astrofotografije kao naučne discipline sredinom XIX veka dovela je do značajnog povećanja u broju otkrivenih asteroida. Maks Vulf (Max Wolf) je bio prvi koji je koristio tehnike astrofotografije za detektovanje asteroida. Sam je otkrio više od 200 objekata. Do kraja XX veka većina astronoma ponovo je izgubila interesovanje za potragom novih asteroida. U to vreme bilo je poznato nešto više od 330 malih tela.

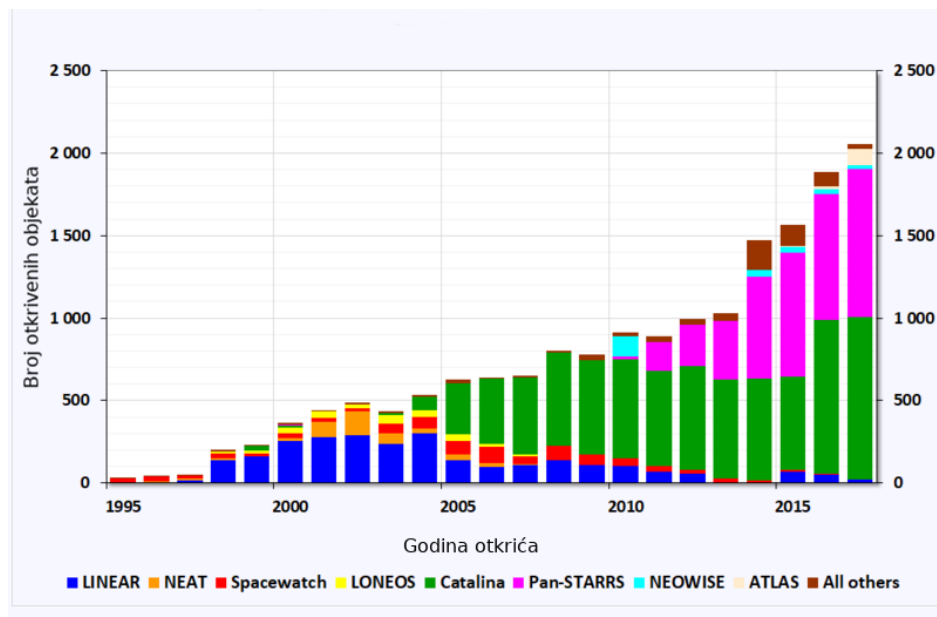
(Grav, T., Jedicke, R., Denneau, L., et al. 2011)

Otkrićem populacije asteroida bliskih Zemlje (NEA), pažnja dela naučne javnosti ponovo je usmerena ka izučavanju asteroida. Budući da orbite asteroida bliskih Zemlji mogu da presecaju Zemljinu orbitu, postoji potencijalna opasnost da neki od ovih objekata udari u planetu Zemlju i na taj način naprave veliku štetu čovečanstvu. Javna zabrinutost za mogućnost uništenja čovečanstva na Zemlji dovela je do razvoja brojnim misijama (Grav, T., Jedicke, R., Denneau, L., et al. 2011). Njihovi instrumenti su potpuno automatizovani i moći će da katalogizacija više od 90% potencijalno opasnih asteroida bliskih Zemlji većih od 140 metara. Time će ispuniti jedan od ciljeva Nacionalne vazduhoplovne i svemirske administracije (NASA). Korišćenjem CCD-a (*charge-coupled device*) i automatskih procedura za redukciju posmatranja, veliki broj automatizovanih pretraga (*surveys*) kao što su *Spacewatch*, *Near-Earth Asteroid Tracking*, *Lincoln Near-Earth Asteroid Research*, i *the Catalina Sky Survey* znatno je doprineo u povećanju broja detektovanih objekata (oko 5000 novootkrivenih objekata mesečno (Stokes et al. 2002)). U trenutku pisanja rada, broj katalogizovanih asteroida iznosio je oko 541 128 (baza MPC).

Širokopojasne pretrage neba pružaju obilje novih informacija o malim telima Sunčevog sistema, no treba imati na umu da su ograničene površinom neba koje mogu da posmatraju odnosno prividnom magnitudom do koje dosežu. Pan-STARRS (*The Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System*) je jedan od nekoliko raznolikih implementacija modernih automatizovanih pretraga neba. Sastoji se od 1,8 metarskog teleskopa RC tipa (*Ritchey-Chrétien*) i zaslužan je za otkriće velikog broja malih tela, kao i za detekciju prvog međuzvezdanog objekta, 1I/2017 U1 koji je prošao kroz Sunčev sistem.

U sledećoj deceniji očekuje se izgradnja i početak rada LSST teleskopa (*Large Synoptic Survey Telescope*), najveće do sada pretrage neba opšte namene. Planirano je da poseduje primarno ogledalo veličine 8,4 metara i kameru rezolucije 3,2 gigapiksela. Kao i postojeće pretrage neba, i LSST će biti u potpunosti automatizovan. Pretraživaće dostupnu površinu neba svakih nekoliko dana sa većom preciznošću i osetljivošću od bilo kog teleskopa koji smo imali do sada. Ovakav teleskop, koji je trenutno u procesu izgradnje, moći će da detektuje za red veličine više objekata od do sada poznatih. Na slici 1.1 prikazan je broj otkrivenih asteroida bliskih Zemlji po godini i misiji.

Iako danas znamo za postojanje velikog broja asteroida i kometa u Sunčevom sistemu, do sada nismo imali prilike da se sretnemo sa objektima koji pripadaju drugim



Slika 1.1: Broj otkrivenih malih tela Sunčevog sistema po godini (Alan B. Chamberlin)

svetovima. Već duže vreme postoje hipoteze o postojanju objekata čije je poreklo van Sunčevog sistema, a koji prolaze kroz Sunčev sistem na hiperboličnim orbitama. Predviđene gustine međuzvezdanih objekata variraju nekoliko redova veličine i kreću se u opsegu od $10^{-3} AU^{-3}$ (McGlynn & Chapman 1989; Jewitt et al.) do $10^{-9} AU^{-3}$ (Moro-Martin et al. 2009). Najnovije procene predviđaju prostornu gustinu međuzvezdanih objekata na $2,4 \cdot 10^{-4} AU^{-3}$ (Do, A., Tucker, M. A., et al. 2018) što ukazuje na to da postoji mogućnost za njihovu detekciju. Nakon otkrića prvog objekta ovog tipa oktobra 2017. godine proučavanje ovakvih objekata naglo dobija na značaju i aktuelnosti.

Cilj rada

Cilj ovog istraživanja, pre svega, je da se ispita mogućnost detekcije malih međuzvezdanih tela (asteroida i kometa) koja prolaze kroz Sunčev sistem. Zanimalo nas je da li je moguće detektovati međuzvezdane objekte pomoću postojećih i budućih pretraga neba kao što su: Pan-STARRS, ZTF, LSST. S tim na umu, modelovana je populacija ove grupe objekata i provereno je kako različiti parametri populacije, poput raspodele po veličinama (*size-frequency distribution*) utiču na broj međuzvezdanih objekata koji bi mogli biti detektovani. Osim toga, prepoznavanje orbitalnih karakteristika, opsega veličina, kao i prividnih karakteristike (pre svega prividne brzine jer one

imaju veoma veliki značaj za mogućnost njihovog otkrivanja) takođe predstavljaju cilj ovog istraživanja.

Nakon uvodnog poglavlja, u drugom poglavlju, date su informacije o međuzvezdanim objektima. U glavi tri povučena je paralela između hiperboličkih orbita međuzvezdanih objekata, kao i objekata u Sunčevom sistemu. Pored toga definisana je hiperbolička anomalija i objašnjen način rešavanja hiperboličke Keplerove jednačine koja nam je potrebna kako bismo odredili položaj tela na hiperboličkoj orbiti. Populacija međuzvezdanih objekata modelovana je u četvrtom poglavlju. Modelovane su orbite objekata kao i njihova prostorna gustina i veličina. Peta glava opisuje sintetički model Sunčevog sistema koji smo koristili kako bismo prividne karakteristike generisane populacije međuzvezdanih objekata poredili sa objektima iz Sunčevog sistema. U šestoj glavi su izvedene prividne karakteristike međuzvezdanih objekata kao i malih tela Sunčevog sistema, dok je u sedmom poglavlju dat kratak osvrt na analizu i rezultate.

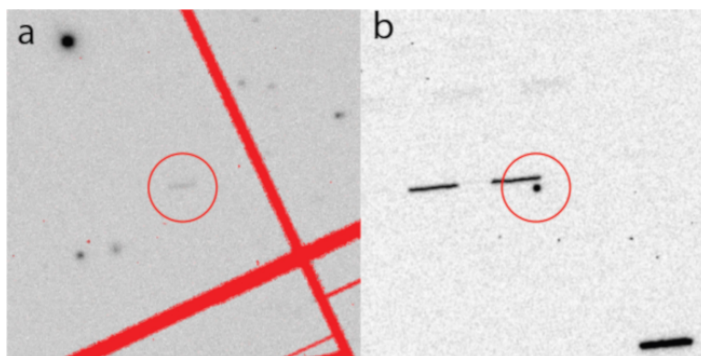
Glava 2

Međuzvezdani objekti

Simulacije i modeli nastanka Sunčevog sistema sugerišu da rane orbitalne migracije gasovitih džinova izbacuju čak i do 99% originalnih planetezimala u međuzvezdani prostor (Charnoz and Morbidelli 2003; Bottke et al. 2005) što bi značilo da međuzvezdani prostor obiluje fragmentima planetazimala. Međutim do oktobra 2017. godine nijedan makroskopski objekat za koji sa sigurnošću možemo da tvrdimo da poseduje međuzvezdano poreklo nije detektovan. Posmatranjem međuzvezdanih objekata i određivanjem njihovih fizičkih i hemijskih karakteristika, dobili bismo dragocene informacije pomoću kojih bismo mogli da otkrijemo tajne nastanka planetarnih sistema.

Prvi objekat čije poreklo ne pripada Sunčevom sistemu otkriven je oktobra 2017. godine. Snimio ga je automatizovani teleskop Pan-STARRS1 (slika 2.1 [a]) i dodelio mu kataloško ime P10Ee5V. Snimljeni objekat privukao je pažnju svojim jako brzim prividnim kretanjem, prelazeći 6,2 lučna stepena dnevno. Analizom snimaka snimljenih pretragom Pan-STARRS1, utvrđeno je da je isti objekat zabeležen i 18. oktobra. Zbog velike ekscentričnosti orbite, ovaj objekat najpre je klasifikovan kao asteroid čija orbita preseca Zemljinu orbitu. Isti objekat, snimio je i Kanadsko-Francusko-Havajski teleskop (*Canada-France-Hawaii Telescope - CFHT*) 22. oktobra (slika 2.1 [b]).

Pažljivijom obradom posmatranja utvrđeno je da je orbita ovog objekta jedinstvena, odnosno da se objekat kreće po orbiti čija je ekscentričnost $1,188 \pm 0,016$ (najveća poznata vrednost ekscentriciteta svih do sada detektovanih objekata) što ukazuje na činjenicu da se objekat kreće po hiperboličkoj putanji. Podaci koji su sakupljeni sa više lokacija u periodu između 14. i 30. oktobra iskorišćeni su za popravku orbitalnih elemenata objekta, te popravljena vrednost za ekscentricitet ovog objekta iznosi $1,1956 \pm 0,0006$ (Meech et al. 2017) što na nivou tačnosti većem od 100σ potvrđuje



Slika 2.1: Snimak prvog međuzvezdanog objekta Oumuamua. [a] Objekat snimljen Pan-STARRS1 pretragom, 19. oktobra 2017. godine. Oumuamua na slici izgleda kao slab trag centriran u krugu. [b] Oumuamua snimljen CFHT, 22. oktobra 2017. godine. Na snimku se može primetiti odsustvo kome.

hiperboličku prirodu orbite. Centar za male planete (The Minor Planet Center - MPC) 24.10.2017. godine označio je novootkriveni objekat kao kometu i dodelio mu kataloški naziv C/2017 U1. Dva dana kasnije, uzimajući u obzir činjenicu da nije bilo detektovanih kometskih aktivnosti, *Minor Planet Electronic Circulars* - MPEC je označio ovaj objekat kao asteroid i dobio je novu oznaku A/2017 U1. Međutim, svi parametri su ukazivali na to da se radi o prvom međuzvezdanom objektu koji je prošao kroz Sunčev sistem, te je objektu konačno dodeljena oznaka 1I/2017 U1. Hronologija katalogizacije ovog objekta data je u tabeli 2.1, dok su u tabeli 2.2 dati njegovi putanjski elementi.

Objekat 1I/2017 U1 inicijalno je otkriven, posmatran i praćen sa više havajskih opservatorija te su havajski lingvisti dobili tu čast da mu dodele ime. Nazvan je Oumuamua ('Oumuamua) što na havajskom jeziku označava glasnika koji je poslat iz daleke prošlosti kako bi dosegao do nas.

Iako sada već sa sigurnošću možemo reći da se radi o prvom detektovanom međuzvezdanom objektu koji je prošao kroz Sunčev sistem, teško je reći da li se radi o kometi ili asteroidu. Brojčani odnos ledenih prema kamenitim objektima u protoplanetarnom disku prilikom formiranja planetarnih sistema varira u zavisnosti od modela i kreće se u granicama od 400:1 do 10000:1 ((Meech et al., 2016)) što bi značilo da je mnogo verovatnije da međuzvezdani objekti budu nalik na komete nego na asteroide. Prilikom detekcije objekta Oumuamua, na osnovu orbitalnih elemenata smatrano je da se radi o kometi,

Datum	Otkriće
19.10.2017.	Detektovan automatizovanim teleskopom Pan-STARRS1
19.10.2017.	Pretragom snimaka od prethodnih noći (18.10.2019.) u podacima Pan-STARRS1, objekat je klasifikovan u grupu asteroida čije orbite presecaju orbitu Zemlje
20.10.2017.	Catalina Sky Survey je klasifikovala objekat kao kratko periodičnu kometu
22.10.2017.	Nakon posmatranja sa CFHT određena je ekscentričnost $e=1.188$ što je ukazivalo na to da se objekat kreće po hiperboličkoj orbiti
24.10.2017.	MPC je označio objekat kao kometu C/2017 U1
26.10.2017.	MPEC je označio objekat kao asteroid i dodeljena mu je oznaka A/2017 U1 Objekat je konačno svrstan u grupu međuzvezdanih objekata i dodeljena mu je oznaka 1I/2017 U1

Tabela 2.1: Hronologija otkrića prvog međuzvezdanog objekta

Element	Heliocentrično	Baricentrično
v_{∞} [km/s]	-	$26,15 \pm 0,05$
q[au]	$0,25383 \pm 0,00023$	$0,25066 \pm 0,00023$
e	$1,1956 \pm 0,0006$	$1,1929 \pm 0,0006$
i [°]	$122,545 \pm 0,021$	$122,592 \pm 0,021$
Ω [°]	$24,6056 \pm 0,0009$	$24,2570 \pm 0,0009$
ω [°]	$241,43 \pm 0,04$	$241,44 \pm 0,04$
T	$2017-09-09.461 \pm 0,004$	$2017-09-09.091 \pm 0,004$
Epoha	2017-09-09.0	1838-01-01.0

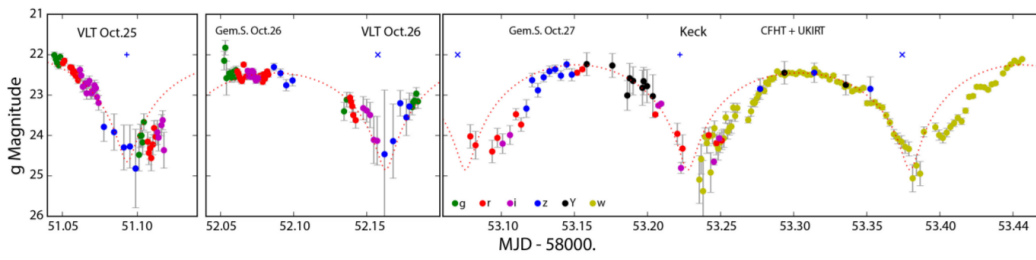
Tabela 2.2: Orbitalni elementi Oumuamue izvedeni iz posmatranja od 14. do 30. oktobra 2017. (Meech et al. 2017)

no analizom snimaka utvrđeno je da ne postoje aktivnosti koje bi ukazivale na kometsku prirodu objekta (Meech et al. 2017). Međutim, astrometrijska posmatranja ukazuju da putanja objekata značajno odstupa od gravitacione i da se odstupanje može objasniti uvođenjem negravitacionih efekata karakterističnim za kometsku aktivnost (Micheli, M., et al. 2018). Sa druge strane postoje tvrdnje da bi negravitacioni uticaji ovolikog intenziteta doveli do značajne evolucije rotacije objekata što bi dovelo i do njegovog raspadanja (Rafikov, 2018). Kontroverze da Oumuamua predstavlja objekat veštačkog porekla (Bialy, Loeb 2018) demantuju posmatranja sa SETI instituta. U rezultatima merenja navodi se da ne postoje aktivnosti koje bi upućivale na veštačko poreklo ovog objekta (Harp, G. R., et al 2019).

U toku spremanja završne verzije ovog rada, detektovan je još jedan međuzvezdani objekat i posmatrački podaci objavljeni su na sajtu MPEC-a. Reč je o kometi C/2019 Q4 (Borisov). Ekscentričnog ovog objekta je daleko veća od svih do sada poznatih i iznosi 3.079. Budući da još nema radova o ovom objektu, njegovu analizu i poređenje sa rezultatima rada ostavljamo za buduća istraživanja.

Kako se navodi u radu (Meech, K. J., Weryk, R. et al. 2017), analizom krive sjaja objekta 1I/2017 U1 (slika 2.2) izračunat je period rotacije koji iznosi $7,34 \pm 0,06$ sati pod uobičajenom pretpostavkom da je dvogrba kriva sjaja posledica samog oblika. Iz medijane magnitude 'Oumuamue može se proceniti srednji prečnik koji iznosi oko 100 metara pod pretpostavkom da vrednost albeda iznosi 0,04. Međutim velike varijacije u krivi sjaja (oko 2.5 magnitude) ukazuju na to da objekat mora biti ekstremno izdužen (sa odnosom osa koji ide i do 10:1), da ima velike varijacije u albedu ili oba. Iako u Sunčevom sistemu postoje objekti čiji je odnos osa uporediv sa odnosom osa objekta Oumuamue, asteroid 1865 Cerebrus, sama mogućnost da je prvi detektovan međuzvezdani objekat izduženiji od izduženijih objekata u Sunčevom sistemu je veoma neočekivana. Jedno od objašnjenja za ovoliko izduženi objekat razmatrano je u radu (Vavilov, D. E., & Medvedev, Y. D. 2019). Diskutovana je mogućnost da je izduženi objekat nalik na Oumuamua, mogao da nastane od blago izduženog objekta približnih dimenzija 500×300 metara. Površinska erozija prouzrokovana bombardovanjem objekta međuzvezdanom prašinom bi mogla da poveća odnos osa, odnosno izduži objekat. Putovanjem kroz međuzvezdani prostor u intervalu od 30 miliona do dve milijarde godina bilo bi dovoljno da promene oblik objektu 1I, odnosno da od blago izduženog tela postane veoma izduženo. Prema ovom modelu, prolazak brzinom od 50 km/s kroz oblak prašine veličine 10 pc i gustine reda $10^{23} g/cm$ bi mogao da dovede do ovako izduženog oblika Oumuamue. Ovaj model takođe može da objasni mali broj međuzvezdanih objekata. Objekti sa manjim prečnicima mogu biti u potpunosti uništeni ovim erozivnim mehanizmom prilikom kretanja kroz galaktički disk.

Pretpostavlja se da je postojanje objekata u međuzvezdanom prostoru posledica pre svega dva mehanizma. Jedan je izbacivanje u međuzvezdani prostor usled bliskih prilaza sa velikim planetama (Gaidos et al. 2017; Portegies Zwart et al. 2017), dok se drugi odnosi na izbacivanje objekata iz Ortovog oblaka nakon što zvezda prodje fazu glavnog niza (Raymond et al. 2017). Očekuje se da će otkrića koja će uslediti, pre svega pomoću LSST, dati jasnije odgovore na ova, kao i na mnoga druga pitanja u vezi sa međuzvezdanim objektima.

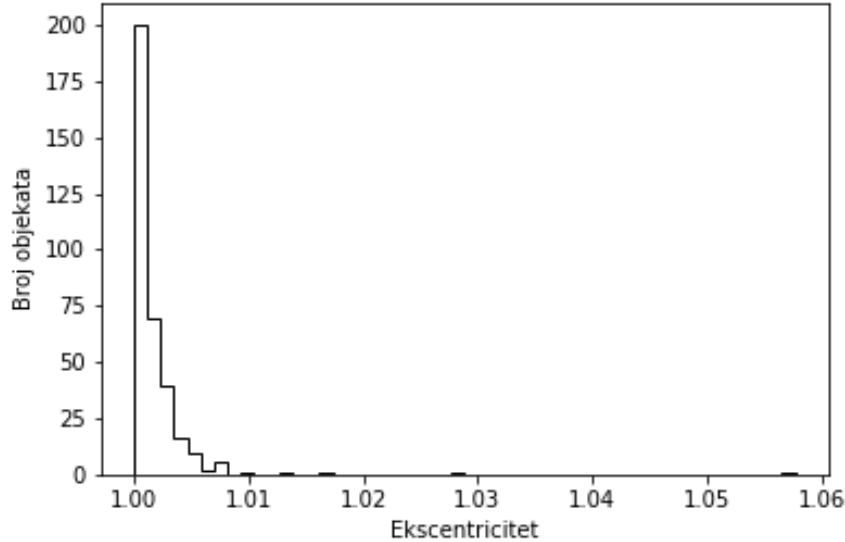


Slika 2.2: Kriva sjaja međuzvezdanog objekta Oumuamua. Isprekidana linije odgovara troosnom elipsoidu sa odnosima osa 10:1:1 sa 207,34 časova. (Meech, K. J., Weryk, R. et al. 2017)

Glava 3

Hiperboličke orbite

Kao što se iz prethodnog poglavlja videlo, prvi međuzvezdani objekat otkriven je zahvaljujući brzini njegovog kretanja i hiperboličkoj orbiti. Međutim situacija nije toliko jasna, zato što u Sunčevom sistemu postoje objekti koji se nalaze na hiperboličkim orbitama sa malim vrednostima ekscentričnosti što nas sprečava da prodremo u prirodu njihovog porekla. Ti objekti se kategorišu kao hiperboličke komete. Hiperboličke komete predstavljaju grupu objekata malih tela Sunčevog sistema koja se kreću po orbitama čija je vrednost ekscentriciteta veća od 1 (hiperboličke orbite). Zbog vrednosti njihovih ekscentriciteta koja je jako malo veća od 1 (slika 3.1), pretpostavlja se da hiperboličke komete vode poreklo iz Ortovog oblaka. Do sada je poznato oko 349 objekata (baza MPC) koji se kreću po hiperboličkim orbitama i ni za jedan od njih se ne može nedvosmisleno reći da je u Sunčev sistem dospeo krećući se po hiperboličkoj orbiti. Najveća poznata vrednost ekscentriciteta hiperboličkih kometa iznosi 1.0577 (baza MPC), sa druge strane značajno ekscentričnija orbita objekta Oumuamua ($e = 1,19951 \pm 0,00018$) ukazuje na to da ovaj objekat nije inicijalno nastao u Sunčevom sistemu, već da je krećući se hiperboličkom orbitom samo prošao kroz njega.



Slika 3.1: Raspodela ekscentriciteta poznatih hiperboličkih kometa

Kao i kod eliptičnih orbita položaj objekta na hiperboličkoj orbiti može se definisati pravom anomalijom (ν) koja predstavlja ugao koji zaklapa pravac žiža-pericentar sa pravcem žiža-pozicija tela na orbiti. Jednačina hiperboličke orbite u polarnom koordinatnom sistemu data je jednačinom 3.1, s tim što treba voditi računa da je ekscentricitet veći od 1.

$$r = \frac{p}{1 + e \cos \nu} = \frac{a(e^2 - 1)}{1 + e \cos \nu} \quad (3.1)$$

Ekscentričnost je označena slovom \mathbf{e} , prava anomalija sa ν , dok je slovom \mathbf{a} označena velika poluosa. Kada r teži beskonačnosti, imenilac polarne jednačine hiperbole će težiti 0, odnosno $1 + e \cos \nu = 0$. Uzimajući vrednost ν_0 za vrednost promenljive prave anomalije ($\nu_0 = \cos^{-1}(-\frac{1}{e})$), dobićemo opseg njenih vrednosti za hiperboličke orbite.

$$\left(-\pi + \cos^{-1}\left(\frac{1}{e}\right), \pi - \cos^{-1}\left(\frac{1}{e}\right)\right)$$

Kod hiperboličkih orbita hiperbolička anomalija se definiše nešto drugačije nego ekscentrična anomalija kod eliptičnih putanja. Umesto referentnog kruga koji se koristi kod eliptičnih orbita, kod hiperboličkih se koristi simetrična hiperbola čija vrednost ekscentriciteta iznosi $e = \sqrt{2}$ i čije su asimptote međusobno upravne (slika 3.2). Hiperbolička anomalija (\mathbf{E}) definiše se kao hiperbolički ugao oivičen centrom simetrije

hiperbole, temenom i projekcijom pozicionog vektora na referentnu krivu, odnosno simetričnu hiperbolu (slika 3.2). Veza između hiperboličke i prave anomalije je slična kao i kod eliptičnih orbita za pravu i ekscentričnu anomaliju, i može se predstaviti jednačinom:

$$\tanh\left(\frac{\nu}{2}\right) = \sqrt{\frac{e+1}{e-1}} \tan\left(\frac{E}{2}\right)$$

Uzimajući u obzir činjenicu da na hiperboličkim orbitama nema periodičnog kretanja, jasno je da pri kretanju objekata po hiperboli ne možemo koristiti izraz za period koji se koristi kod eliptičkih orbita:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{a^3}{\mu}}$$

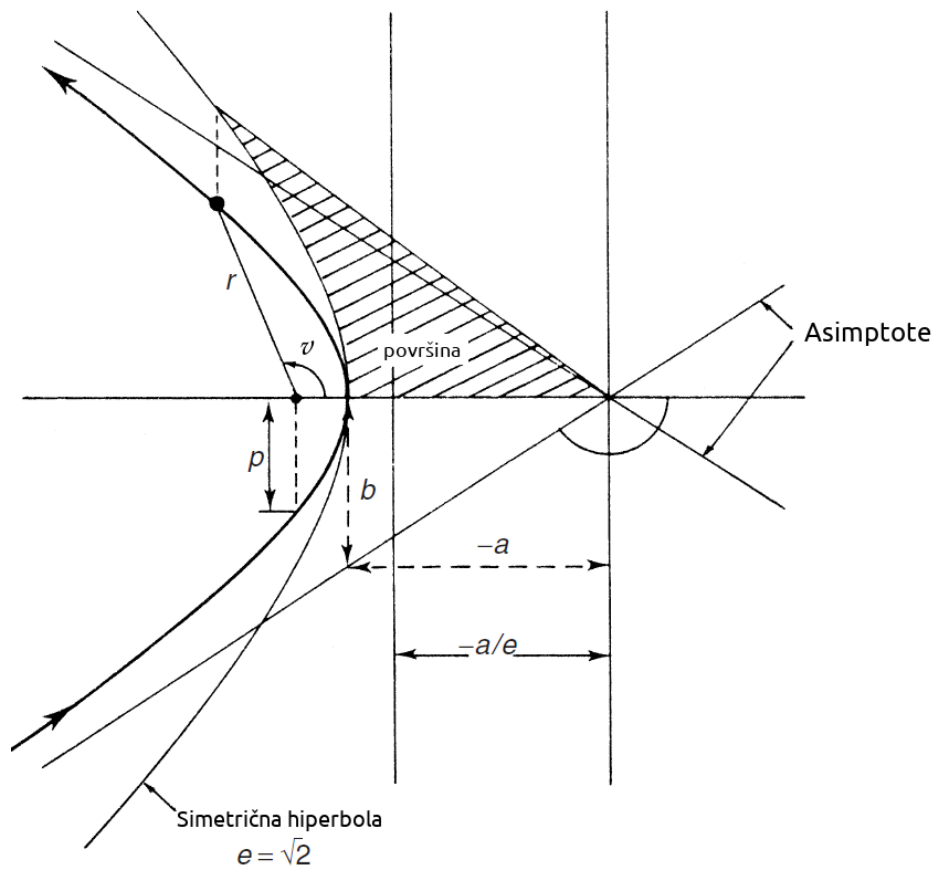
Korišćenjem hiperboličke anomalije, jednačina 3.1 se može predstaviti u obliku:

$$r = a(1 - e \cosh E)$$

Slično kao i kod kretanja po elipsi, položaj objekta na hiperboličkoj orbiti može se odrediti rešavanjem hiperboličke Keplerove jednačine koja je data jednačinom:

$$nt = \sqrt{\frac{\mu}{-a^3}} t = M_h = e \sinh(E) - E \quad (3.2)$$

U toku ovog istraživanja, Keplerova jednačina rešavana je Njutn-Rapsonovom metodom uz specifično određenu početnu vrednost hiperboličke anomalije kako bi se postigla što brža konvergencija (Gooding, R. H., & Odell, A. W. 1988).



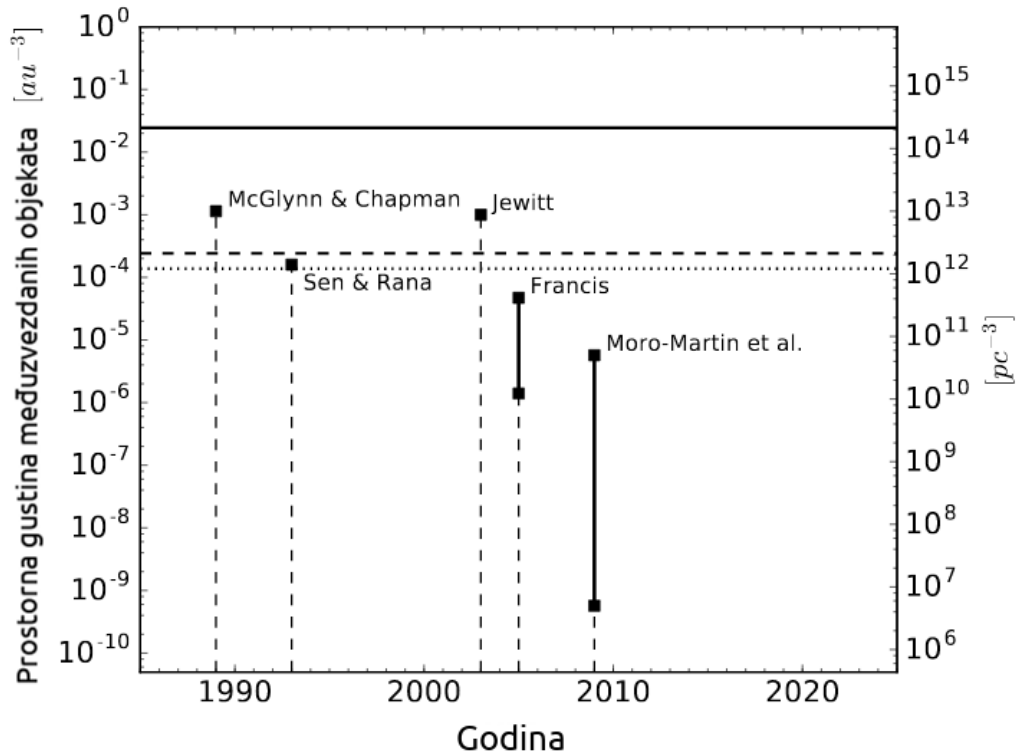
Slika 3.2: Na slici je prikazana hiperbolička orbita zajedno sa referentnom krivom (simetričnom hiperbolom). Površina hiperboličkog ugla predstavlja vrednost hiperboličke anomalije (šrafirana figura)

Glava 4

Modelovanje populacije međuzvezdanih objekata

4.1 Prostorna gustina i veličine objekata

Kada je reč o populaciji međuzvezdanih objekata koji prolaze kroz Sunčev sistem, najvažnija stvar, ali i najveća nepoznanica je broj takvih objekata koje možemo očekivati po jedinici zapremine u okolini Sunca, kao i širom cele Galaksije. Mnogi autori su se bavili procenama ovog broja, no opseg procenjenih vrednosti prostorne gustine međuzvezdanih objekata varira za nekoliko redova veličine i kreće se u opsegu od $10^{-3}au^{-3}$ (McGlynn & Chapman 1989; Jewitt et al.) do $10^{-9}au^{-3}$ (Moro-Martin et al. 2009), pregledniji prikaz procena prostorne gustine međuzvezdanih objekata dat je na slici 4.1. Nedostatak posmatračkih podataka onemogućava nas da potvrdimo ili opovrgnemo neki od modela i na taj način smanjimo velike nesuglasice među njima. Procene koje govore o broju međuzvezdanih objekata nakon što je Oumuamua detektovan (Do, A., Tucker, M. A., & Tonry, J. 2018) ukazuju na to da bi trebalo očekivati oko 0.2 međuzvezdana objekta veća od 100m po kubnoj astronomskoj jedinici, odnosno oko 10^{15} po kubnom parseku.



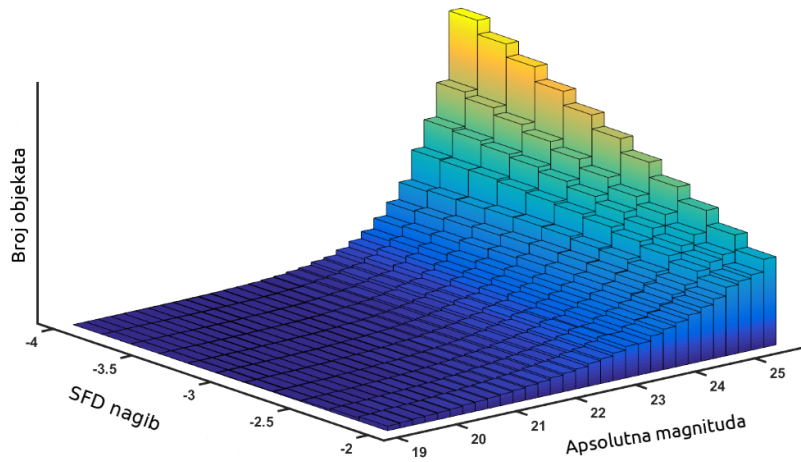
Slika 4.1: Prikaz procena prostorne gustine međuzvezdanih objekata po vremenu (Engelhardt, T., Jedicke, R. 2017)

Druga nepoznanica koja kritično utiče na mogućnost otkrivanja ovih objekata je njihova raspodela po veličinama. Budući da je, kako se pretpostavlja, najveći deo ovih objekata izbačen iz svojih matičnih planetarnih sistema u njihovim ranim fazama evolucije, trebalo bi očekivati da je njihova raspodela po veličinama slična primordijalnoj raspodeli planetezimala. Za raspodele asteroida po veličinama najčešće se koristi stepeni zakon po veličinama D^q odnosno eksponencijalni po apsolutnim magnitudama $10^{\alpha H}$ gde je $q = 5\alpha$. Procene iz rada (Dohnanyi, J. S. 1969) ukazuju na to da je ova raspodela veoma strma, tačnije $N(d > D) \propto D^{-2.5}$ no treba biti pažljiv prilikom izbora raspodele veličine međuzvezdanih objekata uzimajući u obzir i izotropsku eroziju (Vavilov, D. E., & Medvedev, Y. D. 2019) koja može promeniti oblik objekta koji putuje međuzvezdanim prostorom, kao i njihovu veličinu. Budući da je procenjena vrednost albeda objekta Oumuamua u trenutku detekcije bila 4%, u radu smo koristili raspodelu po prečnicima pretpostavljajući da je vrednost albeda 4%. Relacija koja povezuje apsolutnu magnitudu i veličinu objekta za konstantnu vrednost albeda data je jednačinom 4.1 (Harris, A. W., & Harris, A. W. 1997) gde D predstavlja veličinu

objekta, p_v albedo, a H apsolutnu magnitudu.

$$\log D = 3,1236 - 0,5 \log p_v - 0,2H \quad (4.1)$$

Kako su u pitanju parametri sa veoma velikim stepenom neodređenosti, a koji su takođe ključni za procenu broja međuzvezdanih objekata koji bi mogli biti otkriveni, analiza je izvršena za širok opseg ovih parametara, vrednosti za parametar q su uzimane u opsegu -4 do -2. Na slici 4.2 prikazane su apsolutne magnituda za različite vrednosti nagiba raspodele.

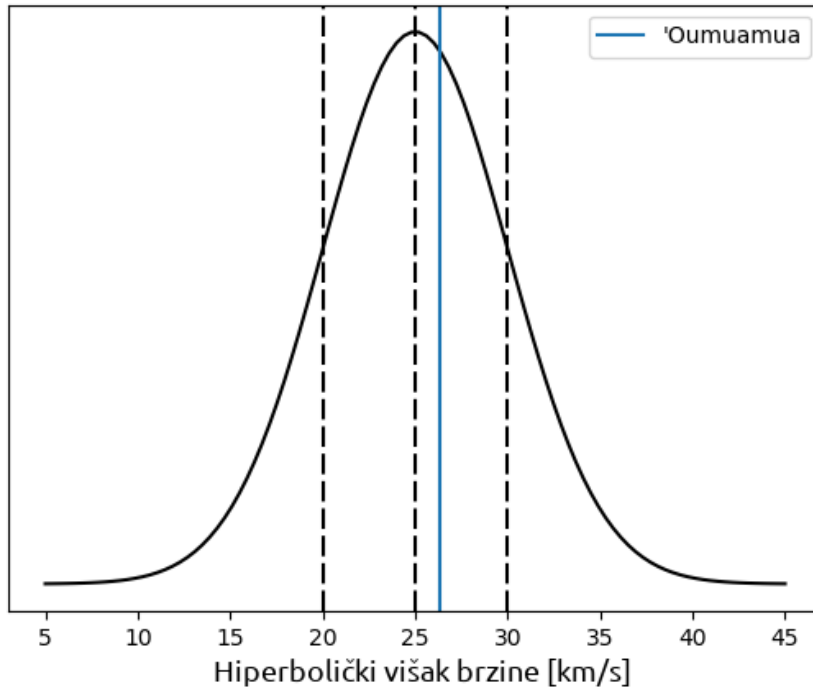


Slika 4.2: Raspodela međuzvezdanih objekata po apsolutnim magnitudama za vrednost albeda 0,04 koja je procenjena za objekat Oumuamua

4.2 Orbite objekata

Polazeći od činjenice da su orbite međuzvezdanih objekata hiperboličke, za očekivati je i da će njihove prividne putanje i brzine biti značajno drugačije od objekata iz Sunčevog sistema. Zbog toga je veoma važno što bolje modelovati populaciju ovih orbita. S obzirom na to da modeli sugerišu da su ovi objekti izbačeni iz svojih planetarnih sistema (Gaidos et al. 2017; Portegies Zwart et al. 2017), polazi se od pretpostavke da bi raspodela njihovih relativnih brzina u odnosu na Sunce, kada se nalaze u beskonačnosti, odnosno hiperbolički višak brzine (v_∞), trebalo da bude slična raspodeli brzina zvezda u okolini Sunca. Zbog toga, tokom ovog istraživanja, pretpostavili smo da je raspodela hiperboličkog viška brzine normalna raspodela sa srednjom vrednošću $v_{sr} = 25 \text{ km/s}$ i

standardnom devijacijom $\sigma = 5\text{km/s}$ (Engelhardt, T., Jedicke, et al. 2017; Dehnen, Binney 1998; Grav et al. 2011). Ova raspodela je prikazana na slici 4.3 na kojoj je označen i položaju objekta Oumuamua. Na slici se može primetiti da se ovaj objekat nalazi u blizini centra raspodele.



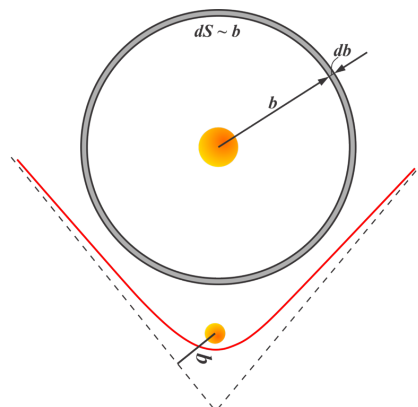
Slika 4.3: Raspodela hiperboličkog viška brzine u odnosu na Sunce

Iz jednačine koja opisuje hiperbolički višak brzine 4.2 (Kemble 2006), možemo izvesti veliku poluosu orbite 4.3.

$$v_{\infty} = \sqrt{\frac{-\mu}{a}} \quad (4.2)$$

$$a = -\frac{\mu}{v_{\infty}^2} \quad (4.3)$$

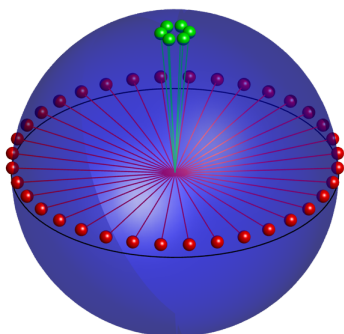
Osim pretpostavke o intenzitetima brzina, racionalno je pretpostaviti da je raspodela rastojanja vektora brzina od Sunca (tzv. B-distance) linearana. Ovo je posledica toga da je verovatnoća da neki vektor nasumičnog pravca i smera prolazi kroz neku površ srazmerna veličini te površi. Dakle, verovatnoća da vektor brzine prolazi kroz neki beskonačno tanak kružni prsten oko Sunca je srazmerna površini tog kružnog prstena, koja je linearna funkcija njegovog poluprečnika, tj rastojanja vektora brzine od Sunca kao što je prikazano na slici 5.3. Kada je poznata brzina objekta u beskonačnosti i rastojanje vektora brzine od Sunca, perihelsko rastojanje q i ekscentričnost hiperboličke orbite e računamo po formulama 5.1 i 5.2 (Kemle 2006).



Slika 4.4: B-distance

$$q = a + \sqrt{a^2 + B^2} \quad (4.4)$$

$$e = 1 - \frac{q}{a} \quad (4.5)$$



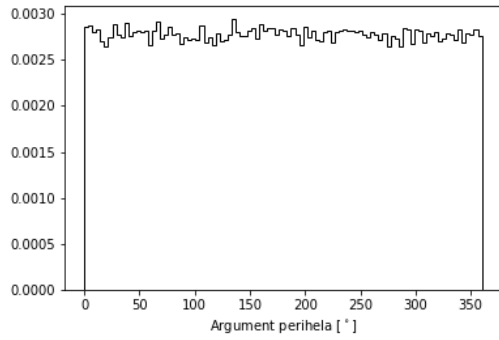
Slika 4.5: Fazni prostor vektora normala na orbitalne ravni

što odgovara orbitama sa velikim nagibima, nego tačaka u blizini ekliptičkog pola, što

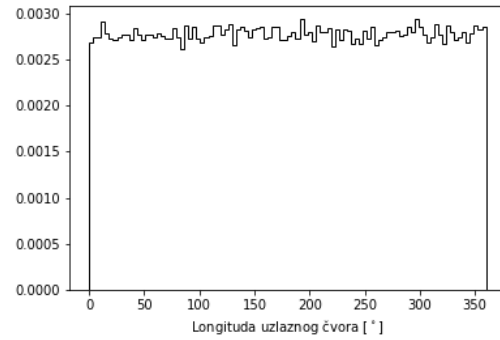
Raspodele longituda uzlaznog čvora i argumenta perihela su uniformne budući da nema nijednog razloga da favorizujemo određeni deo njihovog faznog prostora. Sa druge strane, kada se radi o nagibu orbite, treba imati u vidu da ćemo u slučaju nasumične raspodele pravaca vektora brzina imati sinusoidnu raspodelu po inklinacijama, sa većim brojem objekata na velikim inklinacijama nego u blizini ekliptike. Ova raspodela sledi iz pretpostavke da vektori normala na orbitalne ravni imaju uniformnu raspodelu po celoj sferi. Kao što je prikazano na slici 4.5 u ovom slučaju imamo više tačaka koje su u blizini ekliptičkog pola, što

odgovara objektima na orbitama sa malim nagibima. Budući da je broj ovih tačaka srazmeran površini sfernog pojasa sledi da će raspodela po nagibima biti sinusoidna (Engelhardt, T., Jedicke, et al. 2017).

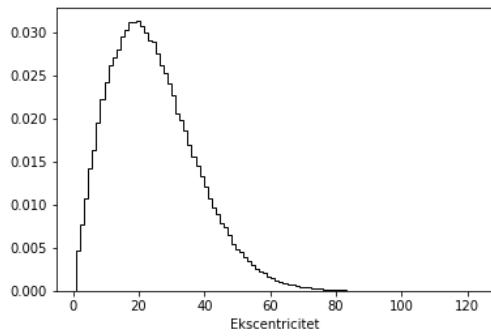
Konačno, nakon što smo odredili pet orbitalnih elemenata koji definišu orbitu, potrebno je odrediti i položaj objekta na toj orbiti u proizvoljnom trenutku vremena kada započinje naša simulacija. Da bismo odredili položaj objekata na orbiti možemo iskoristiti činjenicu da srednja anomalija raste kontinualno u vremenu, te za svaku orbitu možemo pretpostaviti da je svaka srednja anomalija objekta na njoj jednako verovatna. Nasumičnim izborom srednje anomalije za svaki objekat, ali unutar granica koje su definisane simulacijom, odnosno heliocentričnom sferom prečnika 50AU dobili smo raspodelu po M . Da bi međuzvezdani objekat bio detektovan na tom rastojanju potrebno je da mu prečnik bude veličine nekoliko stotina kilometara. Međutim međuzvezdani objekat ove veličine na ovom rastojanju je nerealno očekivati (Engelhardt, T., Jedicke, et al. 2017). Iz tog razloga je uzeta heliocentrična sfera prečnika 50AU. Na slici 4.6 su sumirane raspodele svih 6 orbitalnih elemenata. Na odgovarajućim graficima u glavi 5, date su raspodele orbitalnih elemenata sintetičkih populacija tela Sunčevog sistema kako bi se ukazalo na razlike u odnosu na objekte iz generisane populacije međuzvezdanih objekata.



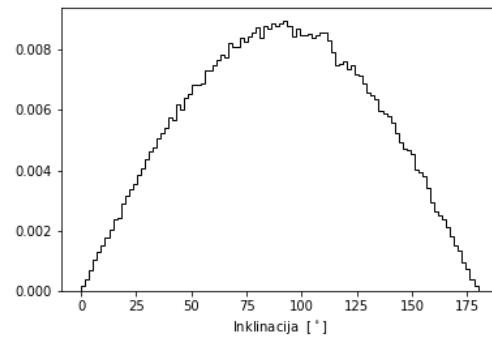
(a) Argument perihela



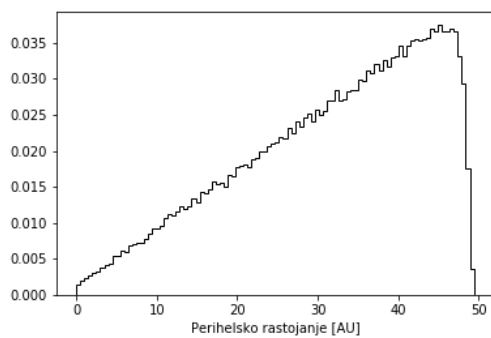
(b) Longituda uzlaznog čvora



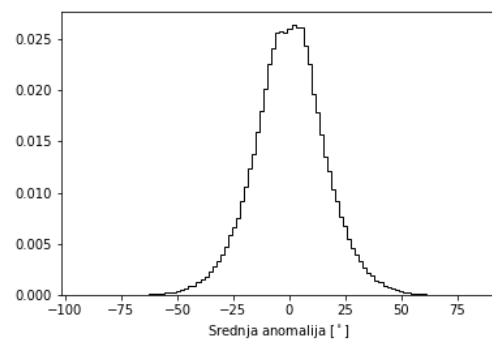
(c) Ekscentricitet



(d) Inklinacija



(e) Perihelsko rastojanje



(f) Srednja anomalija

Slika 4.6: Raspodele putanjskih elemenata generisane populacije međuzvezdanih objekata

Glava 5

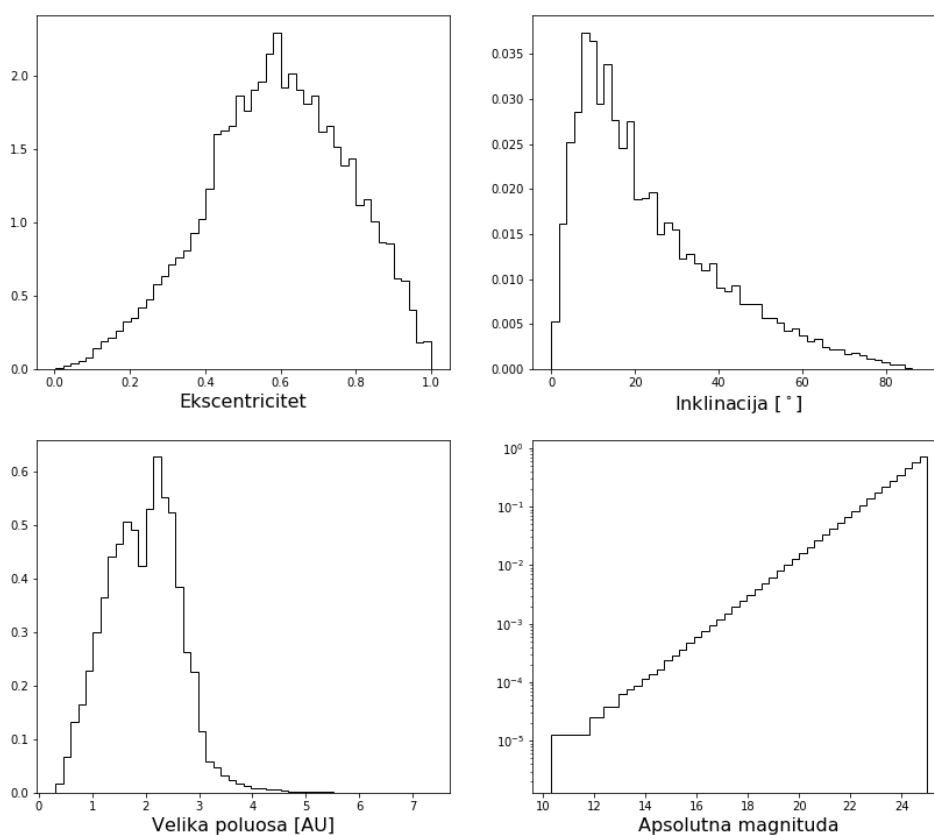
Sintetički model Sunčevog sistema

Za poređenje prividnih karakteristika generisane populacije međuzvezdanih objekata sa poznatim objektima Sunčevog sistema, korišćen je sintetički model Sunčevog sistema (S3M)(Grav, T., Jedicke, R., Denneau, L., et al. 2011). S3M je prvi sveobuhvatni model koji sadrži sve glavne populacije malih tela Sunčevog sistema čije su orbitalne karakteristike takve da imaju mogućnost da dosegnu prividnu magnitudu od 24,5, što odgovara približnoj graničnoj veličini objekata u pokretu koje će LSST moći da detektuje. Izuzetak predstavljaju sintetičke populacije asteroida bliskih Zemlji, koji zbog svoje blizine i bliskih prilaza mogu biti detektovani iako su tamniji, odnosno manji od ~ 50 m ($H \sim 25$).

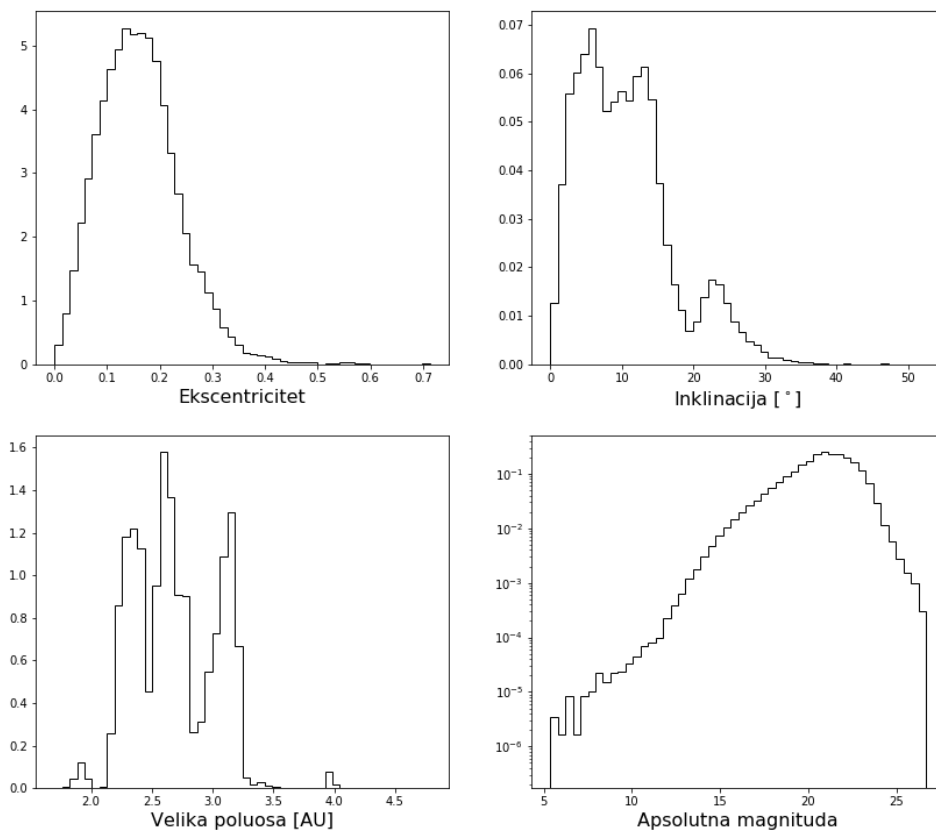
Model se sastoji od oko 14 miliona objekata. U njemu se nalaze sintetičke populacija asteroida bliskih Zemlji, asteroida glavnog asteroidnog pojasa, Jupiterovih trojanaca, Kentaur objekata, Trans-Neptunskih objekata, kometa Jupiterove familije, dugoperiodičnih kometa i, kako ih autori nazivaju, međuzvezdanih kometa. Ovaj model predstavlja alat koji je korišćen prilikom razvoja i testiranja algoritma za otkrivanje malih tela (Moving Object Processing System - MOPS) za Pan-STARRS, a planirano je da bude iskorišćen i na LSSS teleskopu. Svaki objekat u sintetičkom modelu Sunčevog sistema zadat je svojim orbitalnim elementima: perihelsko rastojanje q , ekscentricitet e , inklinacija i , longituda uzlaznog čvora Ω , argument perihela ω , vreme prolaska kroz perihel T kao i apsolutnom magnitudom H . Neke od populacija malih tela su pod veoma snažnim uticajem posmatračko selekcionog efekta što znatno otežava otkriće novih populacija unutar postojećih. Na primer, neki od objekata bliskih Zemlji kreću se oko Sunca po orbitama koje se nalaze u unutrašnjosti Zemljine orbite i zbog toga ih je teško detektovati. Popravka podataka koji su pod dejstvom posmatračko selekcionog

efekta može biti izuzetno komplikovana jer zavisi od složenog skupa faktora uključujući fizičke i dinamičke osobine asteroida, same karakteristike teleskopa i detektora, strategije pretrage, mogućnosti softvera kao i odluka posmatrača. Pregled najčešćih posmatračko selekcionih efekata kao i matematičkih osnova korišćenih za njihovu popravku mogu se naći u radu Jedicke et al. (2002).

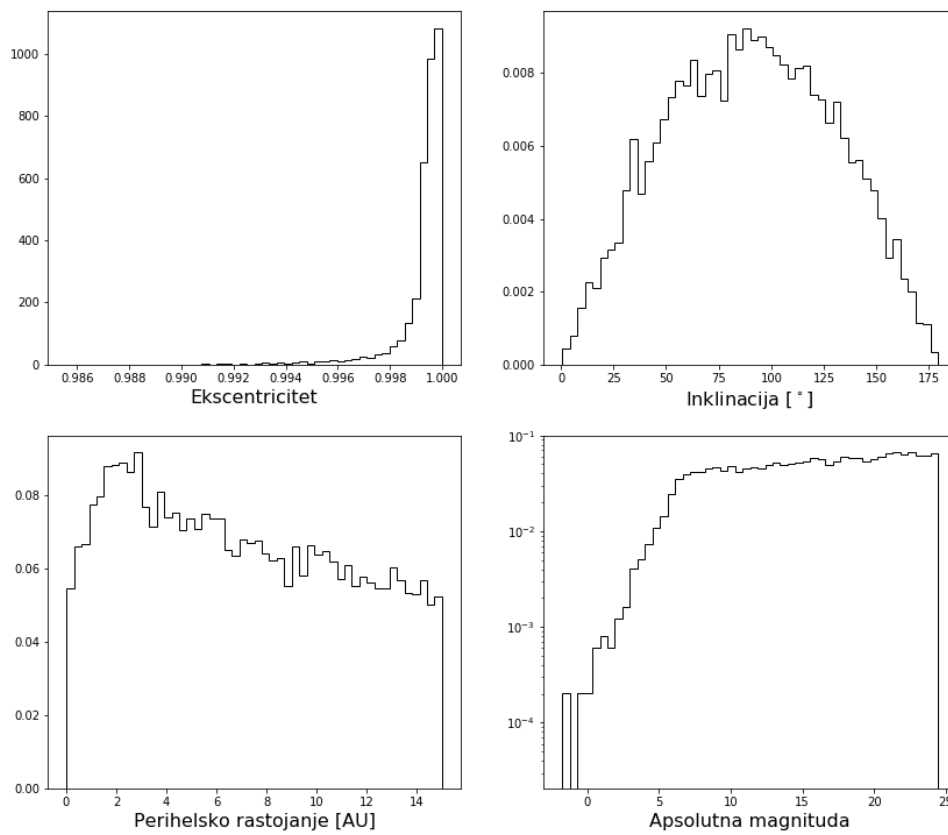
U nastavku su date raspodele putanjskih elemenata sintetičkih populacija asteroida Sunčevog sistema.



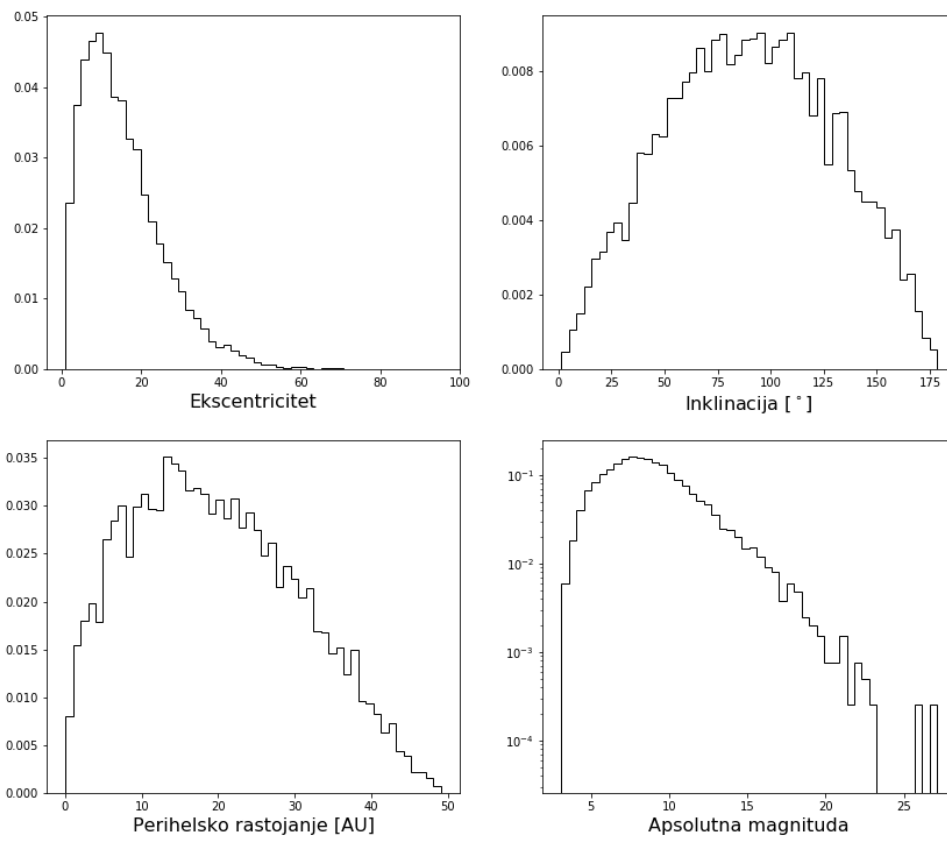
Slika 5.1: Raspodela putanjskih elemenata i apsolutne magnituda asteroida bliskih Zemlji



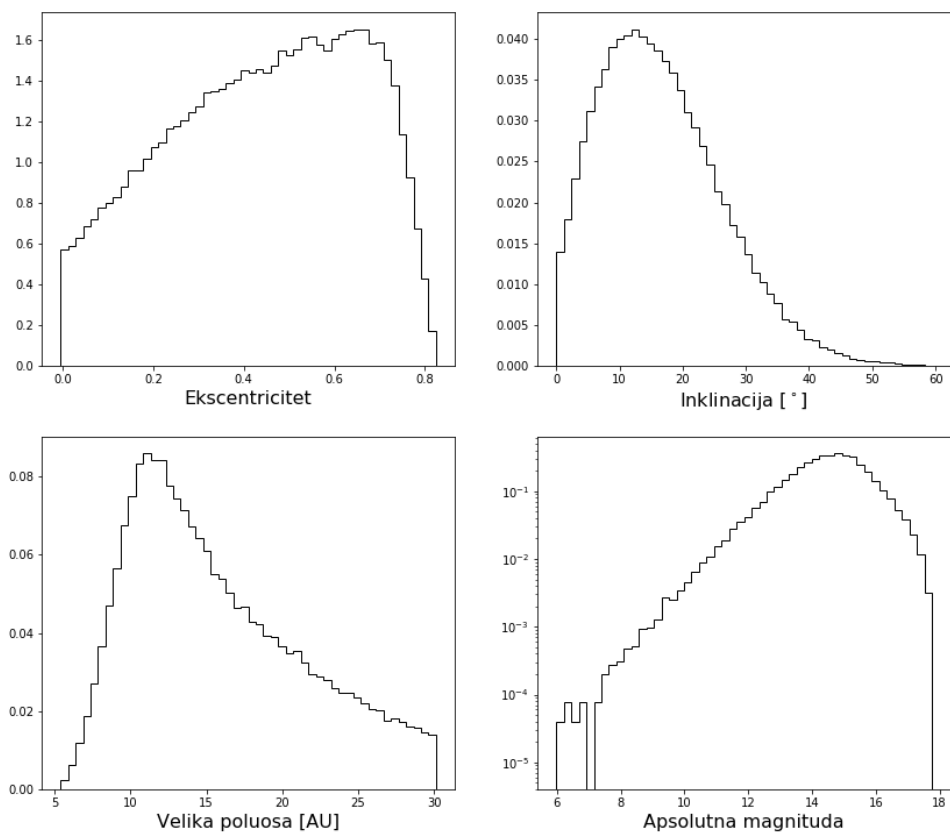
Slika 5.2: Raspodela putanjskih elemenata i apsolutne magnituda asteroida Glavnog asteroidnog prstena



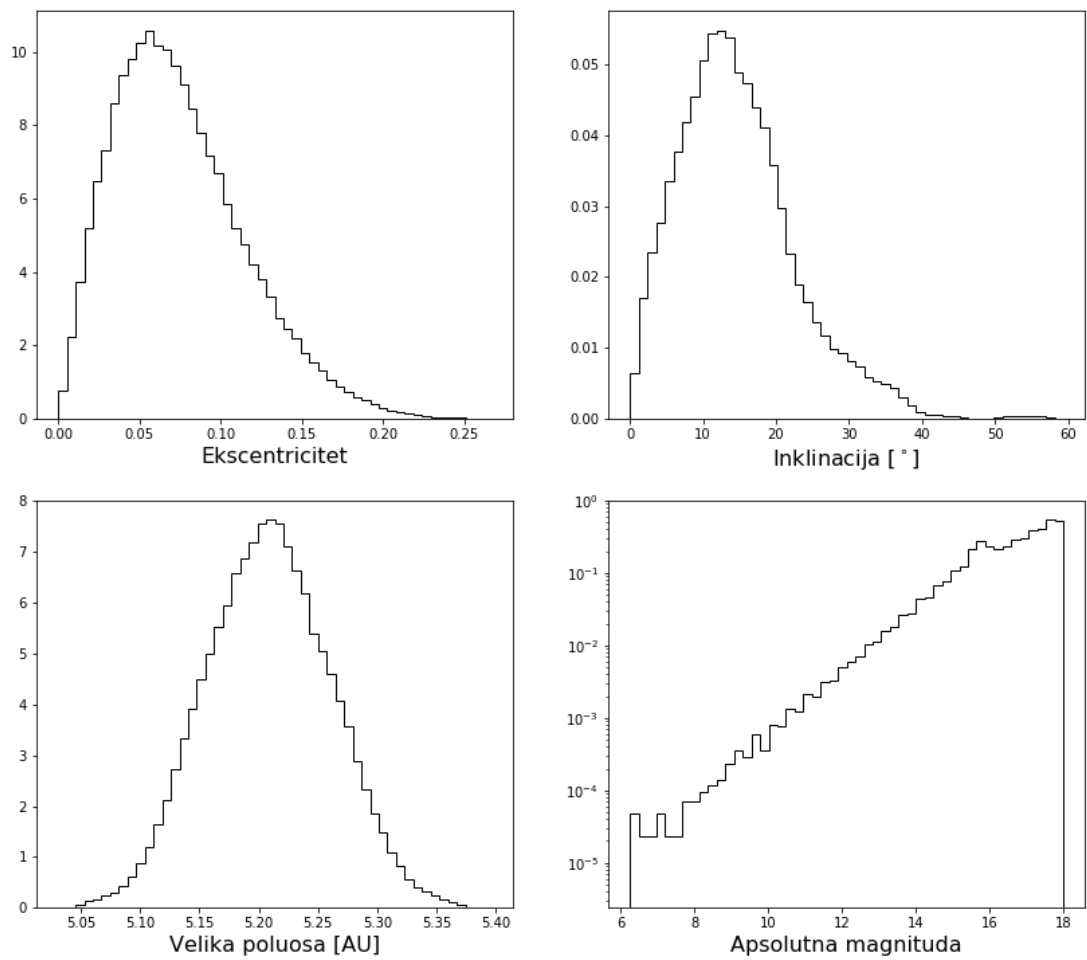
Slika 5.3: Raspodela putanjskih elemenata i apsolutne magnituda dugoperiodičnih kometa



Slika 5.4: Raspodela putanjskih elemenata i apsolutne magnitude hiperboličkih kometa



Slika 5.5: Raspodela putanjskih elemenata i apsolutne magnituda kentaur objekata



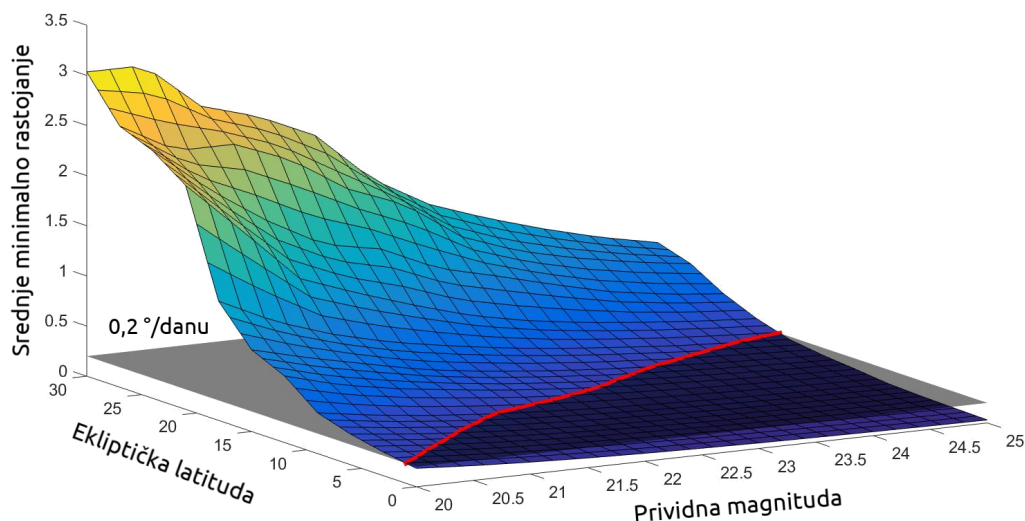
Slika 5.6: Raspodela putanjskih elemenata i apsolutne magnituda Jupiterovih trojanaca

Glava 6

Prividne karakteristike međuzvezdanih objekata i malih tela Sunčevog sistema

Veliki problem prilikom otkrivanja novih asteroida, ne samo međuzvezdanih objekata, već pre svega onih koji pripadaju Sunčevom sistemu predstavlja činjenica da na nebeskoj sferi, pogotovo u zoni ekliptike, postoji veliki broj objekata. Na posmatračkim snimcima ovih regiona često se nalazi i nekoliko hiljada objekata. Da bi ustanovili da li se radi o postojećem ili novootkrivenom objektu potrebno je odrediti orbitu posmatranog objekta, a zatim izračunati efemeride za posmatrani trenutak i uporediti ih sa položajem posmatranog objekta. Za određivanje orbite malih tela potrebno je da posedujemo barem 3 posmatranja u različitim vremenskim intervalima. Naizgled trivijalan problem koji značajno komplikuje određivanje orbite malog tela leži u činjenici da se sva tela kreću, odnosno da nema apsolutnog mirovanja, kao i da se na jednom snimku ne nalazi jedan objekat, što bi u praksi značilo da je potrebno označiti objekte na svakom snimku, odnosno utvrditi koje detekcije pripadaju istom objektu. Ovaj postupak u literaturi je poznat kao problem povezivanja (linkage problem). Da bi se procenila veličina ovog problema, koristeći sintetičke populacije iz S3M izračunali smo srednje minimalno rastojanje među objektima u zavisnosti od prividne magnitudo i ekliptičke latitudo (za svaki objekat treba da pronađemo njemu najbliži objekat i nakon toga odredimo srednju vrednost ovako izračunatih minimalnih rastojanja). Rezultat ovog računa predstavljen je na slici 6.1. Možemo primetiti da srednje minimalno rastojanje opada sa prividnom magnitudom ali raste sa ekliptičkom latitudom, odnosno

udaljavanjem od ekliptike imaćemo manje objekata te će i srednje minimalno rastojanje među njima biti veće.



Slika 6.1: Srednje minimalno rastojanje kao funkcija prividne magnitude i ekliptičke latituda

Budući da se srednje minimalno rastojanje među objektima Sunčevog sistema povećava sa porastom latituda, ukoliko postavimo granicu od $0,2^\circ$ možemo da zaključimo da na latitudama većim od 20° ima jako malo objekata iz Sunčevog sistema, i da je njihovo rastojanje mnogo veće od prividnog rastojanja koje većina međuzvezdanih objekata pređe u toku dana. Ovo stvara mogućnost za jednostavnije povezivanje i jednostavniju detekciju međuzvezdanih objekata (više u poglavlju 7).

Da bismo odredili komponente prividne brzine objekta, potrebno je prvo odrediti njegovu brzinu u odnosu na Sunce, pa potom i brzinu u odnosu na Zemlju. Iz orbitalnih elemenata objekta lako se dobijaju kartezijske koordinate i brzine (x, y, z, v_x, v_y, v_z) . Na slici 6.2 su prikazani vektori položaja i brzine, kao i jedinični vektori koji tangiraju koordinate linije u trenutnom položaju objekta. Očigledno je da se jedinični vektori u pravcu koordinatnih linija sfernog ekliptičkog koordinatnog sistema $(\lambda_0, \beta_0, r_0)$ mogu izraziti funkcijom sfernih koordinata kao:

$$\vec{r}_0 = \cos \beta \cos \lambda \vec{i} + \cos \beta \sin \lambda \vec{j} + \sin \beta \vec{k} \quad (6.1)$$

$$\vec{\lambda}_0 = -\sin \lambda \vec{i} + \cos \lambda \vec{j} \quad (6.2)$$

$$\vec{\beta}_0 = -\sin \beta \cos \lambda \vec{i} - \sin \beta \sin \lambda \vec{j} + \cos \beta \vec{k} \quad (6.3)$$

Veza između prividnih brzina $(\dot{\lambda}, \dot{\beta})$ i projekcija vektora brzine na pravce ovih jediničnih vektora je:

$$v_\lambda = \dot{\lambda} \cos \beta r \quad (6.4)$$

$$v_\beta = \dot{\beta} r \quad (6.5)$$

odakle dobijamo prividne brzine:

$$\dot{\lambda} = \frac{v_\lambda}{\cos \beta r} \quad (6.6)$$

$$\dot{\beta} = \frac{v_\beta}{r} \quad (6.7)$$

Projekcije vektora brzine (v_λ, v_β) se dobijaju iz skalarnih proizvoda vektora brzine sa jediničnim vektorima kao:

$$v_r = \vec{v} \vec{r}_0 \quad (6.8)$$

$$v_\lambda = \vec{v} \vec{\lambda}_0 \quad (6.9)$$

$$v_\beta = \vec{v} \vec{\beta}_0 \quad (6.10)$$

Korišćenjem izraza 6.1-6.3 i 6.8 - 6.10 dobijamo da je:

$$v_\lambda = -\sin \lambda v_x + \cos \lambda v_y \quad (6.11)$$

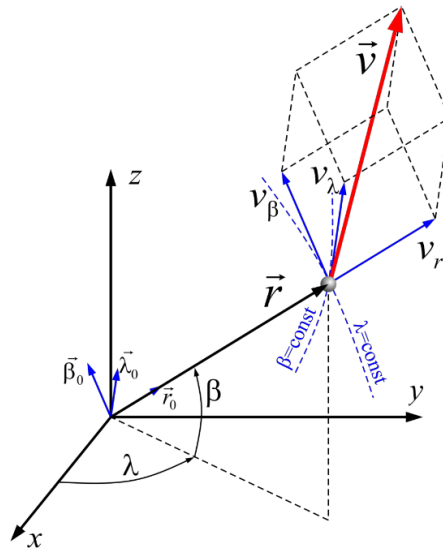
$$v_\beta = -\sin \beta \cos \lambda v_x - \sin \beta \sin \lambda v_y + \cos \beta v_z \quad (6.12)$$

$$v_r = \cos \beta \cos \lambda v_x + \cos \beta \sin \lambda v_y + \sin \beta v_z = \dot{r} \quad (6.13)$$

Zamenom ovih izraza u 6.4 i 6.5 dobijamo prividne brzine objekata u funkciji kartazijanskih brzina i sfernih koordinata objekata:

$$\dot{\lambda} = \frac{-\sin \lambda v_x + \cos \lambda v_y}{\cos \beta r} \quad (6.14)$$

$$\dot{\beta} = \frac{-\sin \beta \cos \lambda v_x - \sin \beta \sin \lambda v_y + \cos \beta v_z}{r} \quad (6.15)$$



Slika 6.2: Vektori položaja i brzine objekata u ekliptičkom koordinatnom sistemu

Budući da je veoma velika prividna gustina objekata na nebu u zoni oko ekliptike, brzina kojom se objekti prividno kreću po nebeskoj sferi je veoma značajna za mogućnosti njihovog otkrivanja.

Da bi mogli da detektujemo posmatrani objekat, potrebno je da bude dovoljno sjajan, odnosno da njegova prividna magnituda bude manja od granične prividne magnituda do koje doseže instrument kojim se posmatra. Prividne magnituda računata su po formuli 6.16 (Jewit et al. 2017; Bowell et al. 1989) gde je H apsolutna magnituda, r_g geocentrična daljina, r_h heliocentrična daljina, a f fazni ugao.

$$m = H + 5 \cdot \log r_g \cdot r_h + 0.04 \cdot f \quad (6.16)$$

Glava 7

Analiza i rezultati

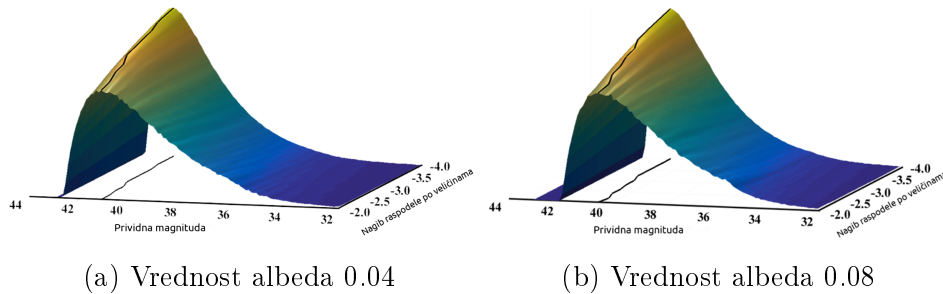
U predhodnim poglavljima izložen je problem i modelovana populacija međuzvezdanih objekata. Između ostalog, zanimalo nas je da li je moguće i u kojoj meri detektovati međuzvezdane objekte koji prolaze kroz Sunčev sistem pomoću postojećih i budućih pretraga neba u periodu od 10 godina. Period od 10 godina je izabran iz razloga što predstavlja nominalni operativni period za LSST. Za potrebe istraživanja, simulacija je pisana u programskom jeziku *python*. Implementirane su rutine za generisanje populacije međuzvezdanih objekata, kao i funkcije za rešavanje hiperboličke Keplerove jednačine. Sunčev sistem oivičen je heliocentričnom sferom prečnika 50 AU. Unutar ovako generisane sfere raspoređeni su međuzvezdani objekti. Broj međuzvezdanih objekata unutar heliocentrične sfere određen je željenom prostornom gustom objekata. Nakon generisanja populacije i inicijalnog postavljanja objekata, rešavana je hiperbolička Keplerova jednačina i proveravano je da li objekat zadovoljava neophodne uslove za detekciju.

Da bi objekat bio detektovanom određenom pretragom potrebno je da bude dovoljno sjajan, kao i da se nađe u delu neba na kome ga je moguće posmatrati. Jako je važno napomenuti da efikasnost otkrivanja novih objekata ne zavisi samo od njihovih prividnih položaja i sjaja, već i od kvaliteta procedura implementiranih u samim pretragama koje su zadužene za povezivanje istih objekata na snimcima istog dela neba u različitim vremenskim intervalima. Ova procedura poznata je pod akronimom MOPS (*Moving Objects Processing System*, Denneauet al.2013). Ovo praktično znači da iako smo u mogućnosti da snimimo novi objekat, ne možemo mu jednostavno odrediti orbitu. Neophodni kriterijumi za mogućnost detekcije međuzvezdanih objekata dati su na osnovu nominalnih karakteristika tri pretrage neba tabelom 7.1:

	LSST	Pan-STARRS	ZTF
Prividna magnituda	$< 24,5$	$< 22,7$	$< 20,5$
Elongacija	> 60	> 60	> 60
Deklinacija	< 20	> -30	> -17
Galaktička latituda	$< -20, > 20$	$< -20, > 20$	$< -20, > 20$

Tabela 7.1: Uslovi za detekciju međuzvezdanih objekata

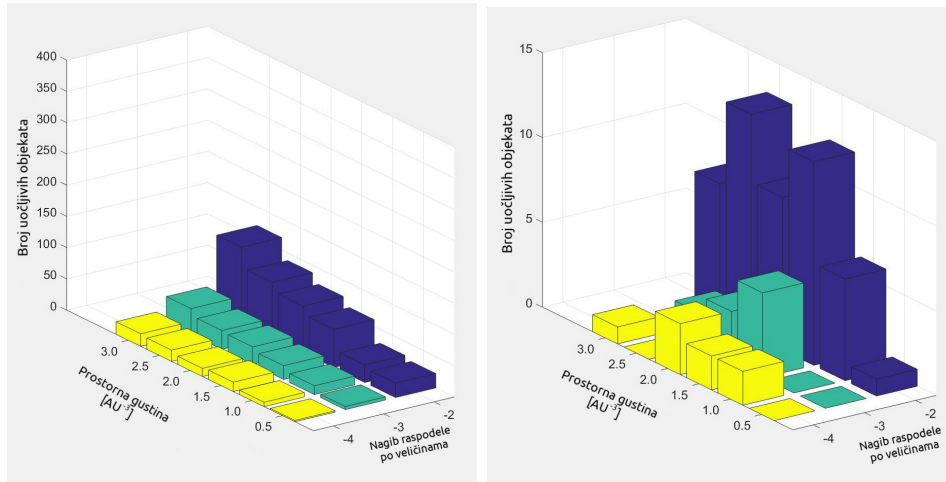
Ukoliko za generisanu populaciju međuzvezdanih objekata u proizvoljnoj epohi izračunamo njihove prividne magnituda, za vrednost albeda uzmemo 0.04, raspodela po magnitudama izgledaće kao na slici 7.1, (a). Ova raspodela zavisice od stepena raspodele veličine međuzvezdanih objekata. Uzimajući u obzir linearnu raspodelu po perihelskim rastojanjima, raspodelu međuzvezdanih objekata po prividnoj magnitudi, kao i granične prividne magnituda do kojih dosežu postojeće i buduće pretrage neba, jasno je da možemo očekivati da detektujemo veoma mali broj međuzvezdanih objekata, odnosno da je trenutno moguće detektovati samo objekte iz dalekog repa ove raspodele. Čak i za dvostruko veću vrednost albeda ne možemo očekivati da je moguće detektovati značajno veći broj međuzvezdanih objekata (slika 7.1), (b).



Slika 7.1: Raspodela prividnih magnituda međuzvezdanih objekata

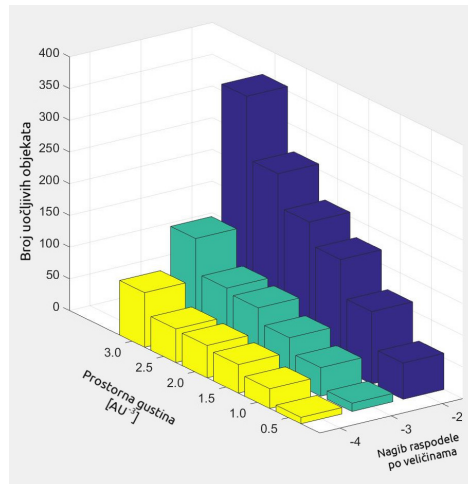
Rezultat simulacije predstavljen je slikom 7.2 na kojoj je prikazan broj međuzvezdanih objekata detektovanih simulacijom u zavisnosti od prostorne gustine objekata (broja objekata po jedinici zapremine) i nagiba raspodele po veličinama. Kao što smo već napomenuli, mogućnost detekcije uslovljena je kvalitetom procedura za povezivanje objekata. Iz tog razloga ćemo detektovane objekte simulacijom nazivati uočljivim objektima. Ukoliko posmatramo broj objekata koje LSST može da uoči (slika 7.2 c)) u slučaju kada je prostorna gustina međuzvezdanih objekata najveća i ukoliko posmatramo najmanji nagib raspodele po veličinama, možemo da zaključimo da je

moгуće detektovati stotine objekata iz ove grupe u operativnom periodu LSST pretrage. Međutim, pogledamo li broj uočljivih objekata za Pan-STARRS, možemo primetiti da nema smisla koristiti najoptimističniji scenario s obzirom na to da se posmatrački podaci ne podudaraju sa ovim modelom. Zbog toga je realno očekivati da je moguće detektovati desetine međuzvezdanih objekata u sledećih 10 godina pomoću LSST-a.



(a) Pan-STARRS

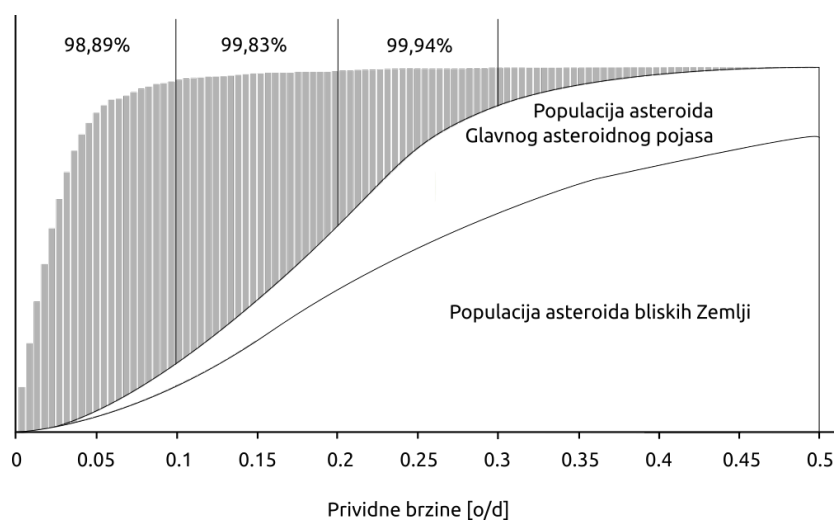
(b) Zwicky Transient Facility



(c) Large Synoptic Survey Telescope

Slika 7.2: Broj detektovanih objekata simulacijom

Raspodela generisane populacije međuzvezdanih objekata po prividnim brzinama, kao i raspodele po prividnim brzinama asteroida Glavnog asteroidnog prstena i asteroida bliskih Zemlji prikazana je na slici 7.3. Njihovim upoređivanjem može se uočiti da se velika većina međuzvezdanih objekata iz generisane populacije kreće veoma sporo. Njihove prividne brzine manje su od prividnih brzina objekata u glavnom asteroidnom pojasu, kao i od prividnih brzina asteroida bliskih Zemlji. Budući da su na hiperboličkim orbitama i da se kreću brže u odnosu na Sunce i Zemlju, prividne brzine međuzvezdanih objekata su veoma male zbog njihove veoma velike udaljenosti (jednačine 6.14 i 6.15). Ovako velike udaljenosti posledica su pretpostavljene raspodele populacije međuzvezdanih objekata, tačnije činjenice da se njihov broj povećava sa heliocentričnim rastojanjem, o čemu je već diskutovano u poglavlju 4. Takođe možemo zaključiti da više od 99,83% međuzvezdanih objekata prelazi manje od $0,2^\circ$ po danu. Ono što je interesantno, Oumuamua u trenutku kada je detektovan, kretao se prividnom brzinom od $6,2^\circ$ jer se nalazio na malom geocentričnom rastojanju. Ovako velike prividne brzine nalaze se u dalekom repu generisane raspodele. Zbog ovoga je sprovedena i analiza prividnih brzina objekata koje je moguće detektovati simulacijum.

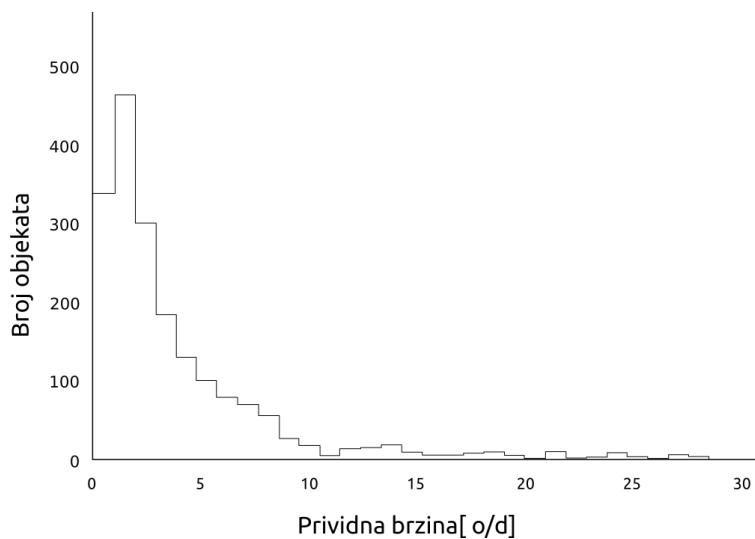


Slika 7.3: Raspodela međuzvezdanih objekata i asteroida po prividnim brzinama

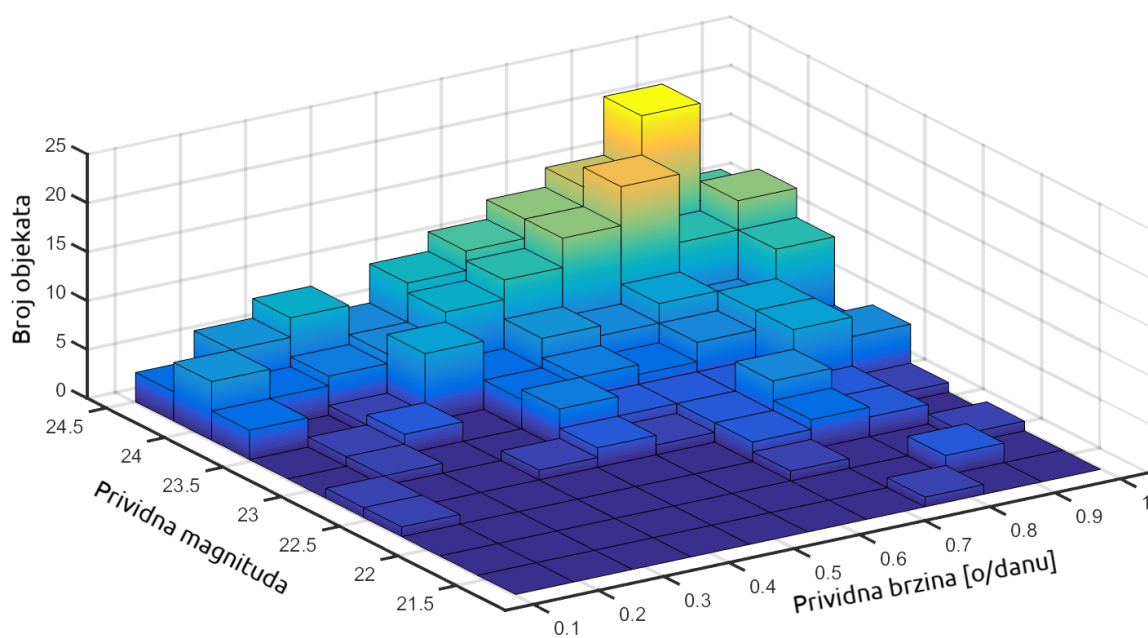
Na slici 7.4 prikazana je raspodela detektovanih međuzvezdanih objekata po prividnim brzinama, odnosno objekata koji su zadovoljili potrebne uslove da bi bili detektovani (tabela 8.1). Očigledno je da su prividne brzine objekata koji se mogu detektovati daleko veće od uobičajenih za celokupnu populaciju međuzvezdanih objekata. Ovo je posledica činjenice da se najsajjniji objekti nalaze na veoma malim geocentričnim

rastojanjima, te su zbog toga njihove prividne brzine velike.

U cilju utvrđivanja mogućnosti detekcije prividno sporijih objekata, analizirana je njihova raspodela po prividnoj magnitudi i prividnoj brzini u trenutku kada im je sjaj dosegao maksimalnu vrednost. Na slici 7.5 vidimo raspodelu detektovanih međuzvezdanih objekata iz generisane populacije. Deo ovičen vrednostima prividne magnitude <22 predstavlja deo objekata koji mogu biti detektovani pan-STARRS teleskopom. Ovakav zaključak je očekivan s obzirom na to da su međuzvezdani objekti jako tamni. Usporedimo li sada rezultate sa pomenute slike sa graničnom prividnom magnitudom do koje doseže LSST, primetićemo da ovaj instrument ima mogućnost da detektuje i prividno značajno sporije objekte nego što je bio Oumuamua. Uzimajući u obzir da je pomoću LSST moguće detektovati i značajno prividno sporije objekte od Oumuamua, interesantno je ovaj rezultat uporediti sa srednjim minimalnim rastojanjem između objekata Sunčevog sistema i njegovu zavisnost od prividne magnitude i ekliptičke latituda, koja je već prikazana na slici 6.1. Kao što se može videti na ovoj slici, na ekliptičkim latitudama većim od 20 stepeni, čak i za veoma tamne objekte možemo očekivati da je srednje minimalno rastojanje između asteroida veće nego što je rastojanje koje neki od međuzvezdanih objekata, koje je moguće detektovati, mogu da predju za jedan dan, što se može videti na slici 7.5. Ovo znači da bi se u ovoj zoni neba mogli daleko jednostavnije otkrivati ovi objekti. Budući da je u njoj jako malo objekata iz Sunčevog sistema, problem povezivanja značajno bi se uprostio. Ovo je veoma važno jer je za LSST predviđeno da se u okolini južnog nebeskog pola (na deklinacijama većim od 65°) sprovodi program koji neće imati dvostruka posmatranja svake noći.

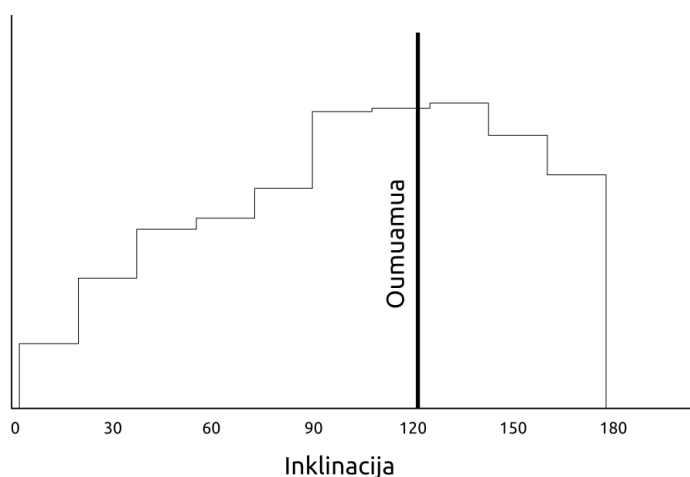


Slika 7.4: Raspodela detektovanih međuzvezdanih objekata (iz generisane populacije) po prividnim brzinama

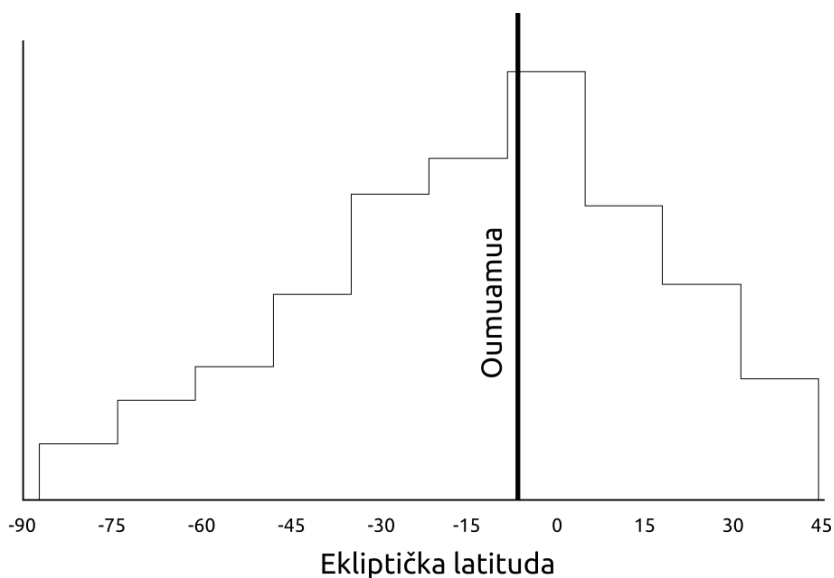


Slika 7.5: Raspodela detektovanih međuzvezdanih objekata (iz generisane populacije) po prividnim brzinama i prividnoj magnitudi

Raspodela međuzvezdanih objekata koje je moguće detektovati po inklinaciji orbite i ekliptičkoj longitudi u trenutku kada sjaj doseže maksimalnu vrednost data je na slikama 7.6 i 7.7. U oba slučaja je uočljivo da se Oumuamua nalazi u okolini maksimuma raspodela što ukazuje na to da se radi o objektu sa očekivanim dinamičkim karakteristikama. Takođe, se može uočiti asimetričnost raspodele u korist objekata koji se kreću retrogradno (slika 7.6) što ukazuje na mogućnost posmatračko-selekcionog efekta.

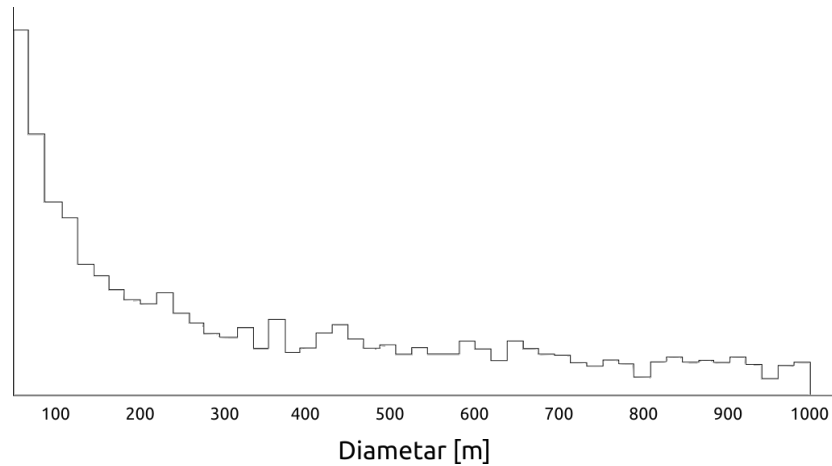


Slika 7.6: Raspodela detektovanih međuzvezdanih objekata (iz generisane populacije) po inklinacijama



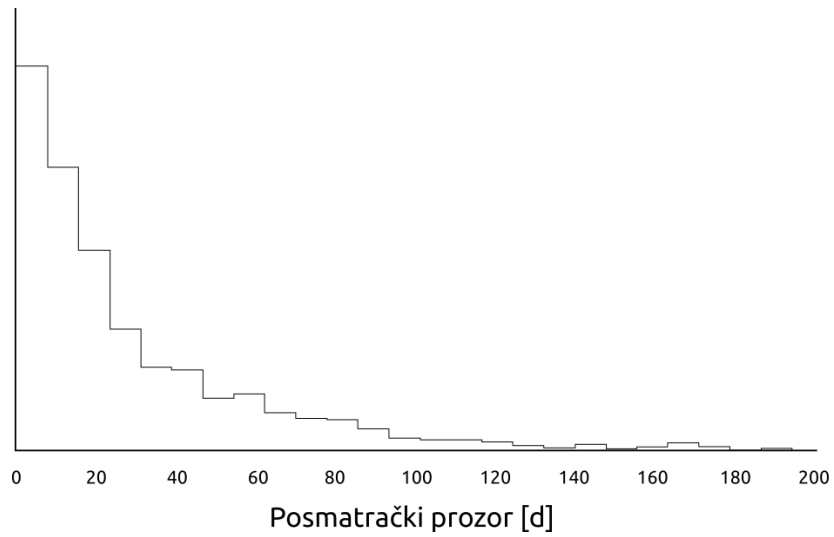
Slika 7.7: Raspodela detektovanih međuzvezdanih objekata (iz generisane populacije) po ekliptičkim latitudama

Na slici 7.8 prikazana je raspodela objekata koji se mogu detektovati po veličinama. Iz ove raspodele može se uočiti da je očekivano najveći broj ovih objekata male veličine, jer njih i ima najviše u populaciji, ali je interesantna činjenica da kod većih objekata ($D > 300$) verovatnoća da objekat bude detektovan veoma malo zavisi od veličine objekta.



Slika 7.8: Raspodela detektovanih međuzvezdanih objekata (iz generisane populacije) po veličinama

Za otkrivanje objekta, osim njegovog sjaja, veoma važnu ulogu igra i vreme koje objekat provede u zoni u kojoj je njegovo posmatranje moguće. Najveći broj objekata je vidljiv nekoliko, ili nekoliko desetina dana, međutim, postoje i objekti koji su vidljivi jako dugo što značajno povećava verovatnoću njihovog otkrivanja. Važno je napomenuti da ovo nisu neprekidni periodi u kojima objekti ispunjavaju uslove iz Tabele 8.1, već sumirani intervali u kojima je objekat vidljiv u toku perioda simulacije od 10 godina. Na slici 7.9 je prikazana raspodela ovih vremena.



Slika 7.9: Vremenski opseg u kome je moguće posmatrati detektovane međuzvezdane objekte

Glava 8

Zaključak

Položaji vrednosti orbitalnih elemenata Oumuamue na odgovarajućim raspodelama orbitalnih elemenata generisane populacije međuzvezdanih objekata, ukazuje nam da prvi detektovani predstavnik međuzvezdanih objekata svojim dinamičkim karakteristikama odgovara modelovanoj populaciji.

Pored toga, u radu je pokazano da se u desetogodišnjem periodu može očekivati nekoliko desetina detekcija međuzvezdanih objekata. Treba biti veom pažljiv prilikom interpretacije ovih rezultata, budući da kao što smo naveli u prethodnim poglavljima, mogućnost detekcije novih objekata u velikoj meri zavisi od automatizovanih procedura zaduženih za povezivanje snimljenih objekata.

Uzimajući u obzir srednja minimalna rastojanja između objekata u Sunčevom sistemu, kao i prividne brzine međuzvezdanih objekata, pretragama neba skromnijih karakteristika mogli bismo da detektujemo međuzvezdane objekte prilikom prolaska kroz Sunčev sistem posmatrajući delove neba na ekliptičkim latitudama većim od 20 stepeni.

Reference

- [1] Bialy, S., & Loeb, A. 2018, APJL, 868, L1
- [2] Bottke, F. W., & Durda, D. D., et al. 2005, Icarus, 179, 63
- [3] Bowell, E., Hapke, B., Domingue, D., et al. 1989, Asteroids II, 524
- [4] Charnoz, S., & Morbidelli, A. 2003, Icarus, 166, 141
- [5] Denneau, L., R. Jedicke, T. Grav, M. Granvik, J. Kubica, A. Milani, P. Vereš, R. Wainscoat, D. Chang, F. Pierfederici, N. Kaiser, K. C. Chambers, J. N. Heasley, E. A. Magnier, P. A. Price, J. Myers, J. Kleyna, H. Hsieh, D. Farnocchia, C. Waters, W. H. Sweeney, D. Green, B. Bolin, W. S. Burgett, J. S. Morgan, J. L. Tonry, K. W. Hodapp, S. Chastel, S. Chesley, A. Fitzsimmons, M. Holman, T. Spahr, D. Tholen, G. V. Williams, S. Abe, J. D. Armstrong, T. H. Bressi, R. Holmes, T. Lister, R. S. McMillan, M. Micheli, E. V. Ryan, W. H. Ryan, & J. V. Scotti 2013, ThePan-STARRS Moving Object Processing System, PASP, 125, 357–395
- [6] de la Fuente Marcos, C., & de la Fuente Marcos, R. 2017, RNAAS, 1, 5
- [7] Do, A., Tucker, M. A., & Tonry, J. 2018, APJ, 855, L10
- [8] Dohnanyi, J. S. 1969, JGR, 74, 2531
- [9] Engelhardt, T., Jedicke, R., Vereš, P., et al. 2017, AJ, 153, 133
- [10] Francis, P. J. 2005, apj, 635, 1348
- [11] Gooding, R. H., & Odell, A. W. 1988, Celestial Mechanics, 44, 267
- [12] Grav, T., Jedicke, R., Denneau, L., et al. 2011, PASP, 123, 423

-
- [13] Harp, G. R., Richards, J., Jenniskens, P., Shostak, S., & Tarter, J. C. 2019, *Acta Astronautica*, 155, 51
- [14] Harris, A. W., & Harris, A. W. 1997, *Icarus*, 126, 450
- [15] Jewitt, D. 2003. Project Pan-STARRS and the Outer Solar System. *Earth, Moon, and Planets* 92(1-4), 465–476.
- [16] Jones, R. L., Jurić, M., & Ivezić, Ž. 2016, *Asteroids: New Observations, New Models*, 318, 282
- [17] Kemble, S., *Interplanetary Mission Analysis and Design*, Springer, 2006.
- [18] Mamajek, E. 2017, *RNAAS*, 1, 21
- [19] McGlynn, T. A., & Chapman, R. D. 1989, *APJL*, 346, L105
- [20] Meech, K. J., Yang, B., Kleyna, J., et al. 2016, *Science Advances*, 2, e1600038
- [21] Meech, K. J., Weryk, R., Micheli, M., et al. 2017, *NAT*, 552, 378
- [22] Micheli, M., Farnocchia, D., Meech, K. J., et al. 2018, *NAT*, 559, 223
- [23] Rafikov, R. R. 2018, *APJL*, 867, L17
- [24] Stokes, G. H., Evans, J. B., & Larson, S. M. 2002, *Asteroids III*, 45
- [25] Vavilov, D. E., & Medvedev, Y. D. 2019, *MNRAS*, 484, L75
- [26] *The History of Meteoritics and Key Meteorite Collections: Fireballs, Falls and Finds* G.J.H. McCall, A.J. Bowden and R.J. Howarth