

Uticaj bliskog zvezdanog prolaska na dinamičke karakteristike Kojperovog pojasa

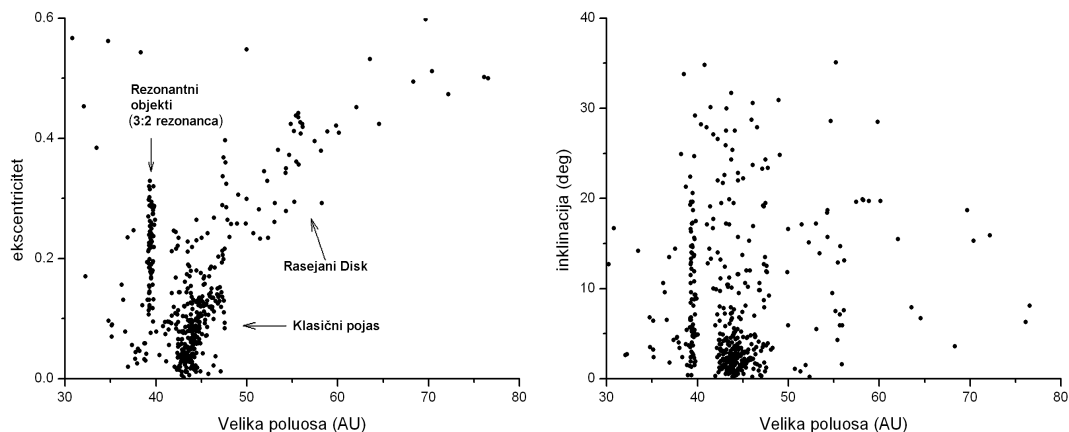
Koristeći numeričke simulacije analizirani su dinamički efekti bliskog zvezdanog prolaska na Kojperov pojas. U vreme formiranja Kojperovog pojasa, zvezda prolazi pored Sunčevog sistema na udaljenosti 100-200 AU i gravitaciono deluje na disk čestica oko Sunca. Rezultati dobijeni simulacijama upoređeni su sa trenutno poznatom raspodelom objekata u pojasu. Karakteristike pojasa koje se mogu objasniti bliskim prolaskom su spoljna ivica na približno 50 AU i široka raspodela ekscentriciteta i inklinacija objekata. Takođe, zvezdani prolazak može da objasni gubitak mase izbačene iz pojasa, kao i poreklo orbita objekata u proširenom rasejanom disku. Da bi navedeni efekti nastali, prolazak zvezde treba da bude direktan, sa malom inklinacijom u odnosu na ravan posmatranog pojasa čestica.

Uvod

Sredinom prošlog veka više naučnika je spekulisalo o mogućem postojanju diska objekata iza planetarnog regiona. Kojper (Kuiper 1951) i Edžvort (Edgeworth 1943) su razmatrali da li bi Pluton mogao biti samo prvi objekat koji je pronađen na udaljenosti većoj od Neptunove. Prvi direktan posmatrački dokaz za ovakvu populaciju objekata dobijen je otkrićem 1992 QB1 (Jewitt, Luu 1993), prvog poznatog objekta u Kojperovom pojasu koji, kako je danas poznato, sadrži velik broj malih tela koja orbitiraju na samoj ivici Sunčevog sistema. Usled velikog rastojanja od Sunca, asteroidi u Kojperovom pojasu imaju veliku vizuelnu magnitudu $m > 19$ i veoma se teško detektuju. Posle više sistematskih pretraga, do septembra 2004. bilo je poznato 948 objekata u pojasu.

Kojperov pojas je nastao iz protoplanetarnog diska, a današnja struktura pojasa je formirana pod intenzivnim gravitacionim uticajem velikih planeta, prvenstveno Neptuna. Na osnovu karakteristika orbita asteroidi u Kojperovom pojasu su podeljeni u tri dinamičke grupe (Luu, Jewitt 2002): (a) klasične, (b) rezonantne i (c) rasejane objekte.

*Bojan Sič (1985),
Novi Sad, Miletićeva
34, učenik 4. razreda
Gimnazije "Jovan
Jovanović Zmaj" u
Novom Sadu*



Rezonantni objekti se nalaze u rezonanci sa kretanjem Neptuna, tj. odnos Neptunovog i njihovog orbitalnog perioda je ceo broj. Najbrojnija je 3:2 rezonanca, koja se nalazi na 39,4 AU (astronomskih jedinica) od Sunca na samoj unutrašnjoj ivici pojasa (slika 1). Rezonantna grupa objekata je nastala povećavanjem udaljenosti Neptuna od Sunca (migracijom) u ranom Sunčevom sistemu (Malhotra 1995).

Najdalji objekti u Kojperovom pojasu su prilično rasejani i imaju veoma ekscentrične putanje sa velikim poluosama $a > 48$ AU. Do sada nije otkriven velik broj rasejanih objekata prvenstveno zbog njihove ogromne udaljenosti od Sunca i činjenice da postaju dovoljno sjajni za otkrivanje samo tokom malog dela putanje, kada se nalaze najbliže Suncu.

Klasični objekti definisani su rastojanjem od Sunca (velika poluosa) koje iznosi $42 \text{ AU} < a < 48 \text{ AU}$, i perihelom $q > 35 \text{ AU}$, tako da nisu pod snažnim uticajem Neptuna. Prema trenutnim saznanjima oni su najbrojnija grupa objekata u Kojperovom pojasu. Široka raspodela inklinacija i ekscentriciteta orbita (Brown 2001, slika 1) ukazuje da su se orbite prilično menjale i nakon njihovog formiranja. Prema teoriji akrecije ti objekti su pri nastanku imali i male ekscentricitete i male inklinacije (Safronov 1969). Ipak, trenutna raspodela inklinacija, kao pokazatelj intenziteta promene putanja tokom vremena, govori da je Kojperov pojas danas u veoma ekscitovanom stanju, tj. da su ga oblikovali razni uticaji i posle njegovog formiranja. Enigmatična karakteristika klasičnog pojasa je i pojava iznenadne i oštre ivice na oko 48 AU (slika 2). Tačna lokacija mogla bi biti rezultat dugotrajnog delovanja Neptuna, ali samo poreklo ivice je nepoznato.

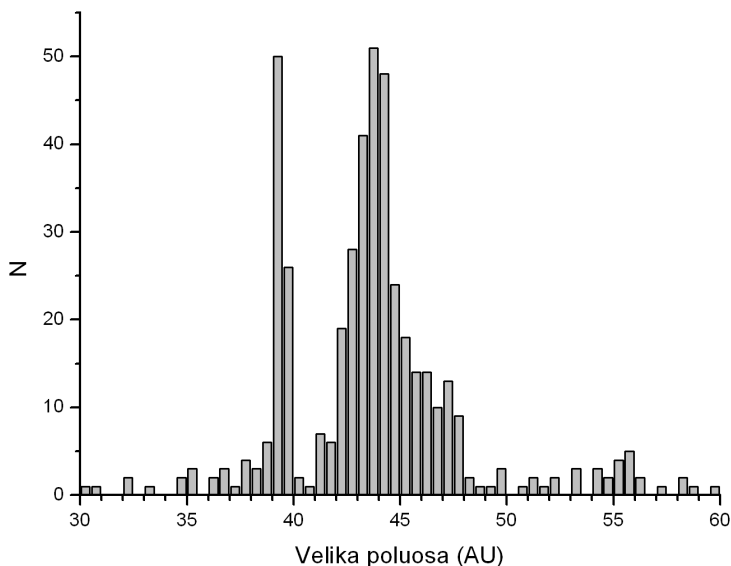
Bliski prolasci zvezda dešavaju se retko zbog velikih međusobnih rastojanja na kojima se nalaze. Sopstveno kretanje Sunca i drugih zvezda u Galaksiji dovodi do 12-14 prolazaka u intervalu od milion godina na rastojanjima manjim od jednog parseka. Tom stopom, najbliži prolazak tokom istorije Sunčevog sistema statistički je bio na 800-900 AU od Sunca

Slika 1.

Orbitalna raspodela ekscentriciteta i inklinacija objekata u Kojperovom pojasu u zavisnosti od velike poluose objekata (Minor Planet Center, oktobar 2004). Ucertani su samo objekti koji su posmatrani tokom više opozicija. Obeležene su i grupe objekata u Kojperovom pojasu: rezonantni objekti (3:2 rezonanca), objekti u klasičnom pojasu i rasejanom disku.

Figure 1.

Kuiper belt object orbital eccentricity and inclination distribution as a function of the objects' semimajor axis (Minor Planet Center, October 2004.). Only multi opposition objects are shown. Resonant objects (3:2 resonance), main belt and scattered disk objects are highlighted.



Slika 2.
Broj objekata u Kojperovom pojasu raspoređenih po velikoj poluosi (Minor Planet Center, oktobar 2004). Iвица klasičnog Kojperovog pojasa se uočava na 48 AU.

Figure 2.
Semimajor axis distribution in the Kuiper belt (Minor Planet Center, October 2004.). Main Kuiper belt boundary is at 48 AU.

(Weissman 1998), rastojanju uporedivom sa najvećim udaljenostima objekata u Kojperovom pojasu. Međutim, ako zvezda pripada određenoj grupi ili jatu, prolasci na manjim rastojanjima su mnogo verovatniji. Sunce je nastalo u zvezdanom jatu za koje se pretpostavlja da je bilo gravitaciono vezano oko 10^8 godina i imalo približno 2000 članova (Adams, Laughlin 2001). Vremenska skala na kojoj se dve zvezde približe na rastojanje od oko 200 AU uporediva je sa vremenskom skalom raspada samog zvezdanog jata (Laughlin, Adams 1998), tako da bliski zvezdani prolasci u velikoj meri utiču na evoluciju protoplanetarnih diskova oko mladih zvezda (Larwood, Kalas 2001).

Bliski zvezdani prolazak generalno utiče na dinamičke karakteristike i strukturu protoplanetarnog diska, a ako početni uslovi dozvoljavaju u planetezimalnom disku će ostati vidljiv efekat takvog prolaska tokom većeg dela života jedne zvezde (Ida *et al.* 2000).

U ovom radu analiziraju se dinamički efekti na protoplanetarni disk ispoljeni uticajem zvezde koja se približi Sunčevom sistemu na vrlo malo rastojanje, reda veličine 100-200 AU. Ovako bliski prolasci u sadašnjem galaktičkom okruženju su malo verovatni. Međutim, dok se Sunce nalazilo u zvezdanom jatu verovatnoća susreta je bila značajno veća. Da bi se uvidelo da li je Sunce doživelo tako blizak prolazak posmatra se da li sadašnja orbitalna raspodela objekata u Kojperovom pojasu ukazuje na dinamičke efekte prolaska u prošlosti. Prilikom prolaska prvenstveno se očekuje povećanje ekscentriciteta i inklinacija objekata, ali se posmatraju i drugi efekti prolaska i traži korelacija sa trenutnim karakteristikama Kojperovog pojasa.

Model

Pojedinačna zvezda, mase jednake jednoj Sunčevoj masi, prolazi pored Sunca na malom rastojanju krećući se hiperboličnom putanjom. Da bi se ispitaio stvarni efekat ovakvog zvezdanog prolaska na prvobitni Kojperov pojas korišćena je numerička simulacija. Simuliran je gravitacioni sistem Sunce-zvezda u kojem se nalaze čestice bez mase koje pojedinačno predstavljaju planetezimala, odnosno Kojperov pojas u celini. Planetezimali su pod uticajem gravitacione sile Sunca (primarna zvezda) i zvezde koja prolazi (sekundarna zvezda) i nema međusobne interakcije. Na početku integracije 6000 planetezimala su uniformno raspoređeni na udaljenosti 30-70 AU od Sunca, nalaze se u jednoj ravni (inklinacije su nula) i kreću se po kružnim putanjama (ekscentriciteti su nula). Početne longituda objekata u disku su dobijene slučajnim vrednostima.

Jednačina kretanja planetezimala u heliocentričnom sistemu (primarna zvezda u centru) koja se integrali u simulaciji je oblika:

$$\frac{d^2 \mathbf{r}_j}{dt^2} = -\frac{G M_2}{|\mathbf{r}_j|^3} \mathbf{r}_j + \frac{G M_1}{|\mathbf{R} - \mathbf{r}_j|^3} (\mathbf{R} - \mathbf{r}_j) - \frac{G M_2}{|\mathbf{R}|^3} \mathbf{R} \quad (1)$$

dok je jednačina kretanja sekundarne zvezde:

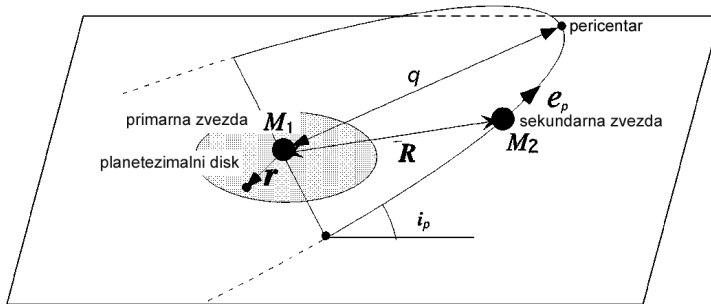
$$\frac{d^2 \mathbf{R}}{dt^2} = -\frac{G (M_1 + M_2)}{|\mathbf{R}|^3} \mathbf{R} \quad (2)$$

gde su M_1 i M_2 mase Sunca i zvezde koja prolazi pored njega, a \mathbf{r}_j i \mathbf{R} vektori položaja planetezimala j i sekundarne zvezde. Prvi izraz na desnoj strani prve jednačine je sila potrebna da izazove Keplerovo kretanje oko Sunca, dok drugi i treći izraz predstavljaju direktnu, odnosno indirektnu silu sekundarne zvezde na planetezimala. Indirektna sila u zvezdanom susretu predstavlja uticaj sekundarne zvezde na Sunce, što se odražava i na kretanje planetezimala.

Za integraciju orbita planetezimala korišćen je *Runge-Kutta* integrator četvrtog reda sa promenljivom vrednošću koraka u integraciji (*adaptive step-size*) i *Cash-Karp* koeficijentima (Press *et al.* 1997). Ovaj metod dozvoljava brzu integraciju velikog broja čestica sa zadovoljavajućom tačnošću (Morbidelli 2002). *Adaptive step-size* kontrola je implementirana na način opisan kod Presa i saradnika (Press *et al.* 1997), zadavanjem maksimalne greške vektora položaja. Za tačnost vektora položaja u simulacijama korišćena je vrednost od jednog kilometra.

Početni položaj sekundarne zvezde je na rastojanju na kojem je intenzitet gravitacione sile 2% intenziteta sile u pericentru (najbliže rastojanje zvezde od Sunca); krajnji položaj je kada sila na čestice iznosi 0.5% najjačeg uticaja, tj. kada se zvezda udalji na dovoljno veliko rastojanje da uticaj na položaj i brzine čestice postane neznatan. Sistem se posmatra duže nakon prolaska kroz pericentar zato što je uticaj zvezde na pojas tada izraženiji (Larwood, Kalas 2001).

Parametri prolaska su: masa sekundarne zvezde (M_2), pericentar susreta (q), inklinacija orbite zvezde u odnosu na ravan planetezimalnog diska



Slika 3.

Prikaz bliskog zvezdanog prolaska pored primarne zvezde mase M_1 . Orbita zvezde mase M_2 koja prolazi pored planetezimalnog diska je definisana udaljenošću pericentra q , ekscentricitetom e_p , inklinacijom i_p , i brzinom u pericentru V_p .

(i_p), i brzina kretanja sekundarne zvezde u pericentru (V_p). Prolazak zvezde je šematski prikazan na slici 3. Izvršena je serija numeričkih simulacija susreta pri kojima su menjane vrednosti određenih parametara. Parametar kojem vrednost nije menjana je masa zvezde koja je uvek bila jednaka masi Sunca. Zvezda se, kod svih prolazaka, nalazi u pericentru kada je u ravni planetezimalnog diska, odnosno argument perihela prolaska je jednak nuli. Prolasci sa vrednostima inklinacije od $0^\circ < i_p < 90^\circ$ spadaju u direktne prolasci (disk orbitira u istom smeru u kojem i prilazi zvezda), ako je $i_p = 90^\circ$ susreti su vertikalni (zvezda prolazi normalno u odnosu na disk), a sa inklinacijama $90^\circ < i_p < 180^\circ$ prolasci su retrogradni (smer zvezde suprotan od smera rotacije diska). S obzirom na to da posmatramo prolazak unutar zvezdanog jata, relativna brzina zvezde u odnosu na Sunce ne prelazi nekoliko kilometara u sekundi. Za brzine zvezde uzimane su vrednosti u rasponu 3-7 km/s (Quillen *et al.* 2004). Brzina zvezde je najveća u pericentru i iznosi:

$$V_p^2 = (1 + e_p) \frac{G (M_1 + M_2)}{q} \quad (3)$$

gde je e_p ekscentricitet orbite sekundarne zvezde.

S obzirom na to da je planetezimalni disk simetričan u ravni, longituda perihela zvezde je proizvoljan parametar i ni na koji način ne utiče na efekte samog prolaska. Simulirani zvezdani prolasci su opisani u tabeli 1. Parametri

Figure 3.

Close stellar encounter with the primary star M_1 and secondary star M_2 which passes by the planetesimal disk. Orbital parameters of the secondary star are: perihelion distance q , eccentricity e_p , inclination i_p , pericenter velocity V_p .

simulacija su redni broj simulacije, inklinacija sekundarne zvezde u odnosu na planetezimalni disk, udaljenost pericentra zvezde i brzina zvezde u pericentru.

Položaji planetezimala i drugi orbitalni elementi potrebni za proučavanje uticaja prolaska se upisuju pri završetku simulacije.

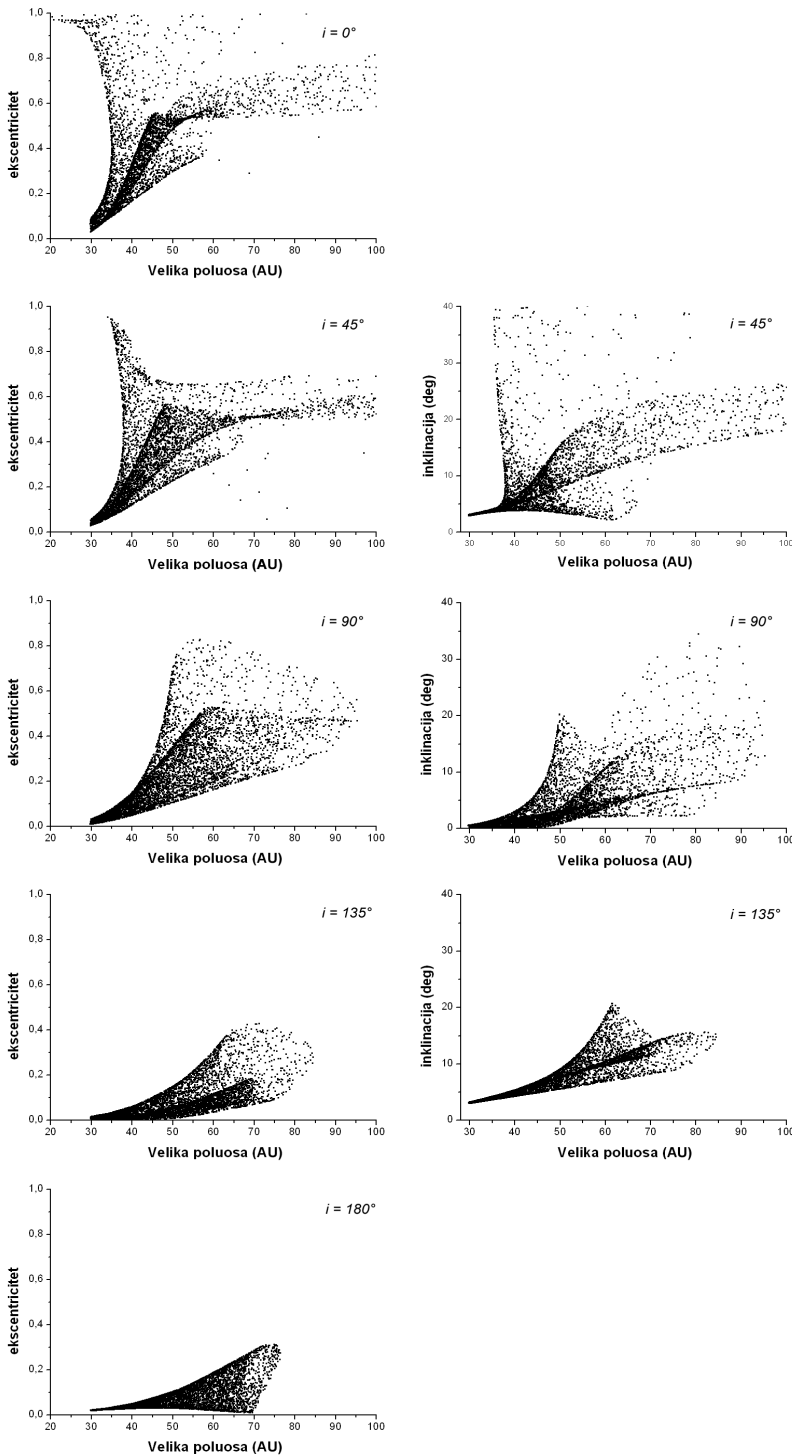
Tabela 1. Parametri simuliranih prolazaka

Simulacija	Inklinacija (°)	Udaljenost pericentra (AU)	Brzina u pericentru (km/s)
1	0	121.4	3.35
2	45	121.4	3.35
3	90	121.4	3.35
4	135	121.4	3.35
5	180	121.4	3.35
6	0	105.9	6.95
7	0	122.2	6.95
8	0	197.0	6.95

Rezultati

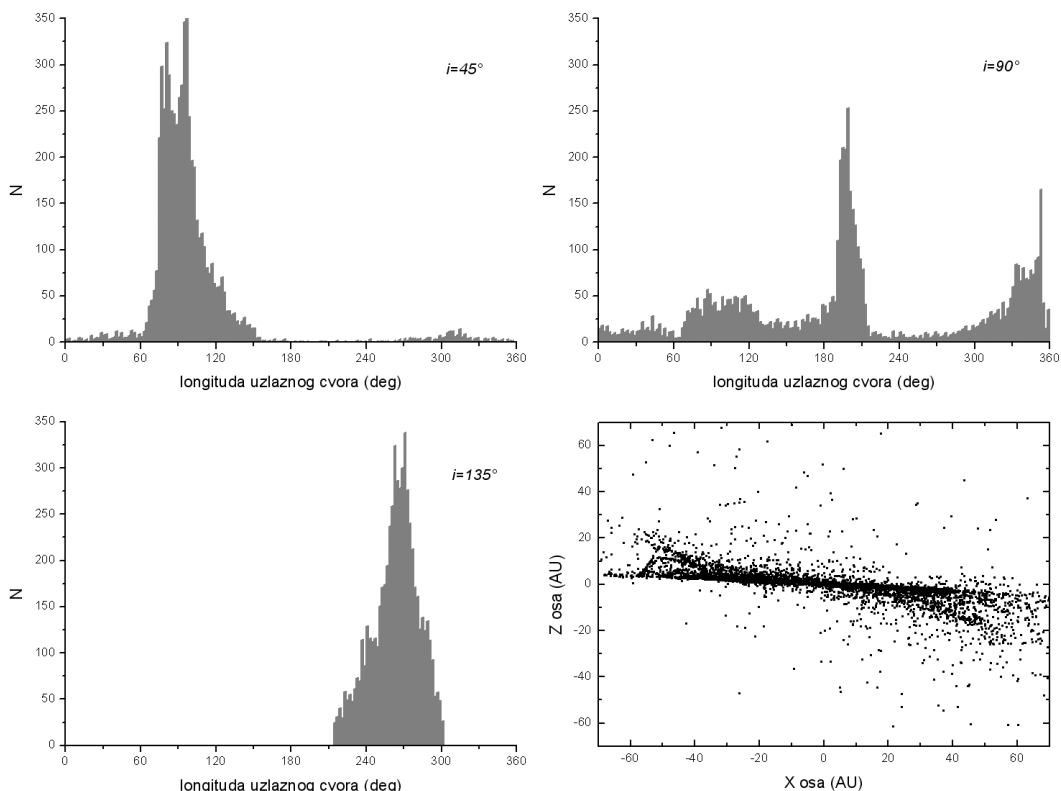
Tipičan prostorni prikaz planetezimalnog diska u poslednjem koraku simulacije je predstavljen na slici 8.

Pri koplanarnim prolascima, tj. kad se ravan putanje zvezde podudara sa ravni diska, planetezimalima se usled uticaja zvezde menja jedino ekscentricitet. Ako ravan početnog diska i putanja zvezde nisu koplanarni, tj. ako su različito orijentisani u prostoru, tada interakcija zvezde i planetezimala utiče i na vertikalno kretanje čestica, tj. menja im i inklinaciju. Promena ekscentriciteta i inklinacija planetezimala prilikom susreta je prikazana na slici 4. Uočljivo je da bliski zvezdani prolasci značajno povećavaju ove orbitalne elemente. Takođe se vidi da direktni prolasci imaju znatno veći uticaj od retrogradnih koji samo neznatno povećaju ekscentricitete i inklinacije objekata. Uticaj zvezde na objekte je različit i u zavisnosti je od njihove udaljenosti od Sunca i od položaja u samom disku. Na planetezimalima koje su bliže Suncu promene su manje, a uticaj na njih je ujednačen, što se objašnjava velikom orbitalnom brzinom, usled koje se svi ovi objekti približe zvezdi na malo rastojanje kad je ona najbliža disku. U spoljnom delu pojasa, uticaj prolaska na vrednosti ekscentriciteta i inklinacija mnogo više zavisi od položaja čestice u disku. Na strani bližoj pericentru prolaska uticaji su najizraženiji, dok su na suprotnoj strani pojasa primetno manji. Jedino je kod retrogradnog koplanarnog prolaska (simulacija 5) uticaj na ekscentricitet ujednačen sa obe strane, dok je kod svih ostalih simulacija



Slika 4.
 Promene
 ekscentriciteta i
 inklinacije
 planetezimala posle
 bliskog prolaska sa
 različitim
 inklinacijama orbite
 zvezde (naznačeno na
 graficima) koja je
 prošla na udaljenosti
 pericentra $q = 121.4$
 AU i brzinom $V_p =$
 $= 3.35$ km/s.
 Uočljivo je da su
 jače promene
 prilikom prolazaka sa
 manjim vrednostima
 inklinacije.

Figure 4.
 The final
 planetesimal
 eccentricity (left) and
 inclination (right)
 distribution as a
 function of
 semimajor axis
 following various
 encounters
 (inclinations are
 given on the graphs).
 The star's orbit
 pericenter is at 121.4
 AU, velocity at the
 pericenter $V_p = 3.35$
 km/s. More intensive
 changes of the disk
 are visible after
 lower inclination
 encounters.



na slici 4 primetna različita jačina promene na suprotnim stranama diska. Kada se dobijene raspodele sa slike 4 uporede sa sadašnjom raspodelom sa slike 1, uočava se da se sa trenutnim vrednostima ekscentriciteta i inklinacija objekata u Kojperovom pojasu najbolje slažu uticaji direktnih prolazaka. Zvezdani prolazak dobro objašnjava postojanje objekata sa većim inklinacijama i ekscentricitetima u sadašnjoj raspodeli, a takođe i objekte sa nižim vrednostima ovih orbitalnih elemenata.

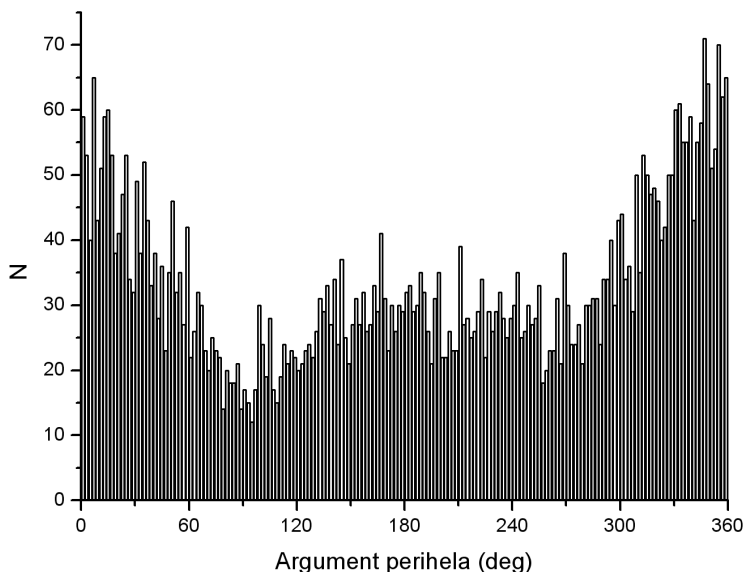
Vrednosti longitude uzlaznog čvora su prikazane na slici 5. Posle zvezdanih prolazaka objekti dobijaju vrednosti longitude uzlaznog čvora unutar relativno malog intervala, odnosno prolazak orijentiše putanje planetezimala na taj način da u istom delu diska seku orbitalnu ravan. Uočava se da kod retrogradnog prolaska (slika 5c) gotovo sve čestice imaju longitude uzlaznog čvora u jednom malom intervalu ($\approx 60^\circ$), dok kod direktnih i vertikalnih susreta jedan deo čestica ima vrednosti longitude koje su izvan glavnog intervala, mada broj takvih objekata nije velik. U prostornoj raspodeli planetezimala ovaj efekat je uočljiv u vidu dva mala kraka koja se odvajaju od diska i koja su drugačije orijentisana na različitim stranama diska (slika 5d). U današnjem Kojperovom pojasu ovakva raspodela longitude uzlaznog čvora nije vidljiva.

Slika 5.

Raspodela longitude uzlaznog čvora posle prolazaka sa različitim inklinacijama (naznačena na graficima), pericentrom na $q = 121.4$ AU, brzinom $V_p = 3.35$ km/s; predstavljena je i prostorna raspodela objekata posle prolaska $i = 45^\circ$ projektovana na ravan X-Z gde se uočava efekat promene ovog orbitalnog elementa na čestice u pojasu.

Figure 5.

Ascending-node distribution following various encounters with different inclinations



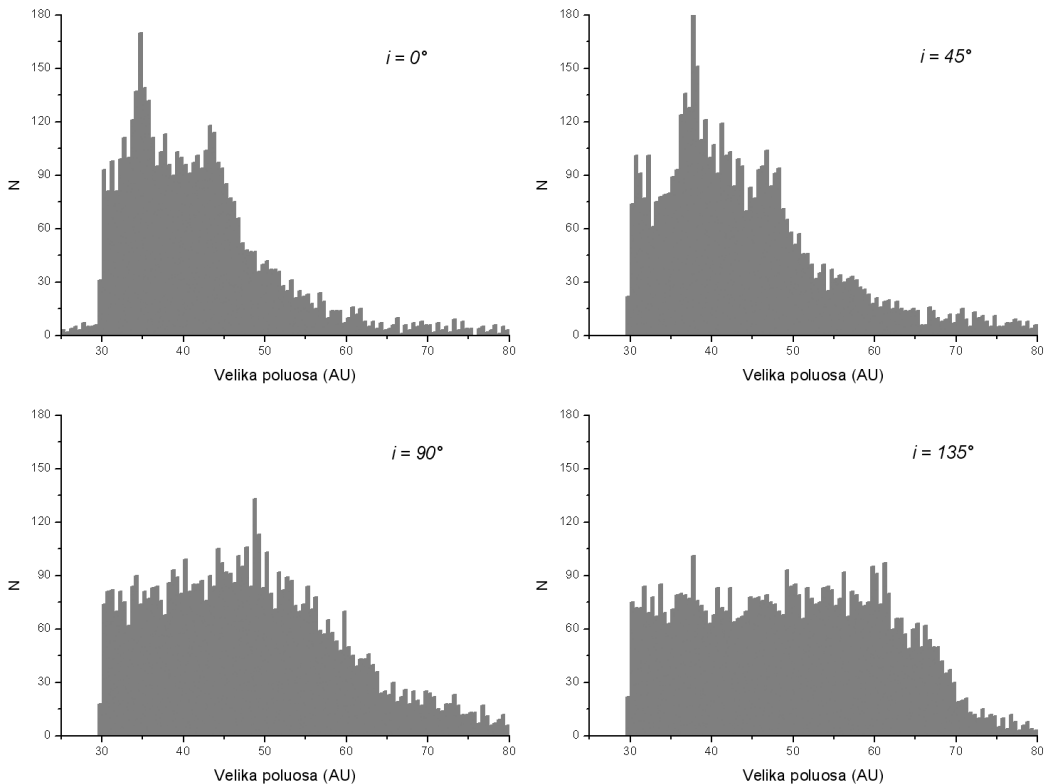
Slika 6.
 Raspodela argumenta perihela posle simulacije 4.

Figure 6.
 Perihelion argument distribution after Simulation 4.

Raspodela argumenta perihela data je na slici 6. Efekat bliskog prolaska na argument perihela čestica je isti kod svih izvršenih simulacija i karakteriše ga orijentacija ovog orbitalnog elementa u jednom smeru, ka pericentru susreta. Trenutna raspodela argumenta perihela u Kojperovom pojasu ne oslikava efekte bliskog prolaska na ovaj orbitalni element.

Brzina zvezde pri prolasku je menjana u rasponu 3-7 km/s. Različite brzine iz datog intervala daju gotovo iste efekte sa malom razlikom u jačini promene. Neznatno su uticajniji prolasci sa manjom brzinom jer se uticaji zvezde duže zadržavaju u regionu pojasa, ali za većinu raspodela koje se posmatraju razlika je gotovo neprimetna.

Raspodela objekata po velikoj poluosi nam govori koliko je objekata ostalo na određenim rastojanjima od Sunca posle prolaska zvezde i ukazuje na položaj ivice planetezimalnog diska. Početna raspodela je bila ravnomerna, dok po njenoj promeni možemo videti koliki je bio intenzitet uticaja određenog susreta na disk planetezimala. Velike poluose objekata posle bliskog prolaska prikazane su na slici 7. Za retrogradne prolasci raspodela po velikoj poluosi se nije drastično menjala, ivica diska se nalazi i dalje na 70 AU, a jedini efekat susreta je blaža granica ivice. Dejstvo vertikalnog prolaska na pojas je intenzivnije, tako da se granica pojasa pomera za oko 5 AU. Iz datih raspodela proizilazi zaključak da su direktni susreti najuticajniji i najrazorniji po disk planetezimala s obzirom na to da je promena velikih poluosa posle njihovog uticaja najveća. Kod direktnih prolazaka sa pericentrom $q = 121$ AU spoljna ivica planetezimalnog diska je na $r \approx 55$ AU, na približnom rastojanju sadašnje ivice klasičnog Kojperovog pojasa. Ivica nastala bliskim prolaskom nije konačna, jer na nju kasnije deluju i dinamički i akrecioni efekti.



Rezonantni efekti nisu došli do izražaja prilikom simuliranih bliskih prolazaka, iako su po Ostrajkeru (Ostriker 1994) ovakvi efekti važni tokom prolazaka i treba da se jave između orbitalne frekvencije planetezimala i orbitalne frekvencije sekundarne zvezde kada se ona nalazi u pericentru.

U prostornoj raspodeli objekata prilikom zvezdanog prolaska nastaju istaknute spiralne i prstenaste strukture. Najuočljiviji efekat bliskog prolaska je pojava vrlo izražene spirale (slika 8) čiji se krak izduži pri prolasku zvezde i do 800 AU. Spiralna struktura se javlja samo pri direktnim prolascima i nije nastala u simulaciji 8 tokom prolaska sa pericentrom $q = 197$ AU, što znači da se ne javlja pri susretima kad je odnos $a/q \approx 3$ (odnos udaljenosti spoljne ivice i najmanjeg rastojanja zvezde). Objekti u spirali su na velikim udaljenostima, ali kako imaju veoma izdužene putanje oni se približavaju planetarnom regionu u trenucima kad su najbliže Suncu, u perihelu (slika 9). Ti objekti bi se mogli povezati sa objektima u današnjem proširenom rasejanom pojasu. Na slici 9 ucrtana su dva objekta iz proširenog rasejanog pojasa, 2000 CR₁₀₅ ($a = 230$ AU, $q = 44.4$ AU) i Sedna ($a = 531$ AU, $q = 74.4$ AU), i uočava se sličnost njihovih orbita sa orbitama objekata u spirali. Postoje dva oblika prstenastih struktura: jedan koji se nalazi u samom glavnom delu pojasa (slika 10 desno) i drugi koji se stvara na većem rastojanju i koji je nagnut pod uglom koji određuje inklinacija prolaska

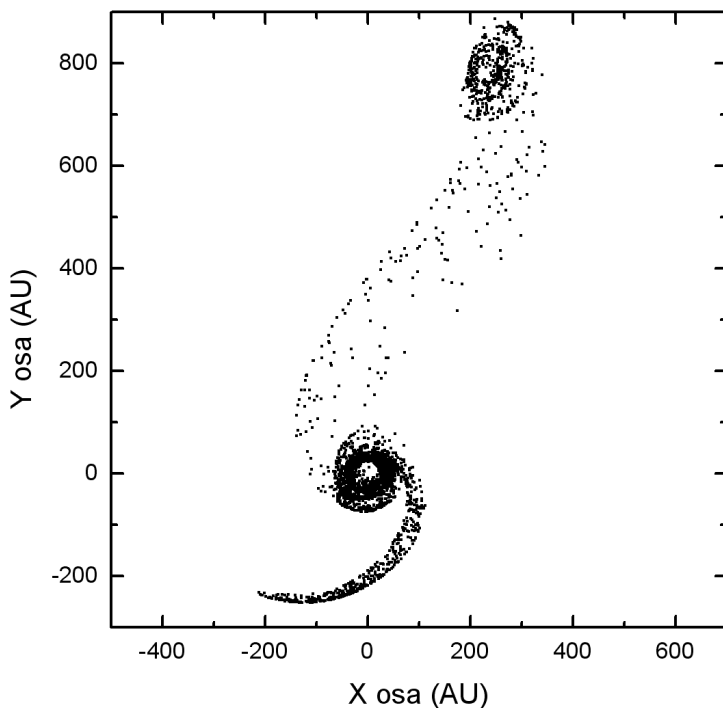
Slika 7.

Raspodela velikih poluosa za prolaska sa različitim inklinacijama. Parametri susreta su: udaljenost pericentra $q = 121.4$ AU, brzina prolaska $V_p = 3.35$ km/s. Uočava se smanjivanje broja objekata u spoljašnjem delu planetezimalnog diska i formiranje ivice.

Figure 7.

Semimajor axis distribution following various encounters with different inclinations (marked on graphs).

Encounter parameters: pericenter at 121.4 AU, velocity at pericenter $V_p = 3.35$ km/s. A reduction of the number of planetesimals is noticeable in the outer part of the disk and a formation of an abrupt boundary is visible.

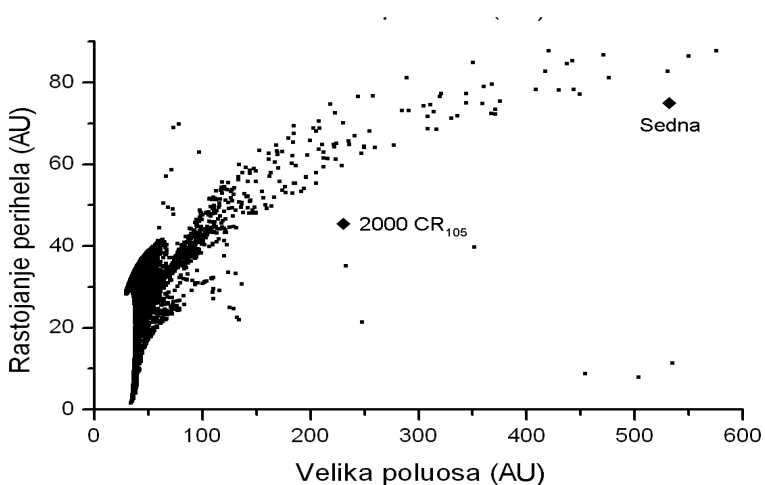
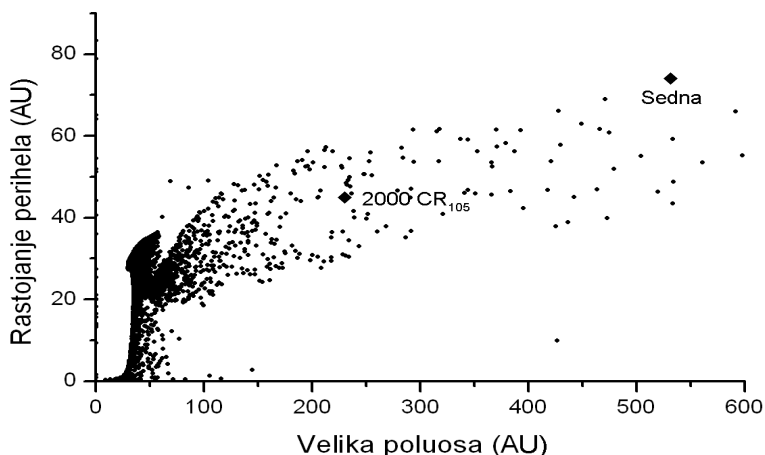


Slika 8.
 Prostorna distribucija čestica posle simulacije 6 bliskog prolaska projektovana na orbitalnu ravan (X-Y ravan). Zvezda disku prilazi iz donjeg levog ugla na grafiku, a pravac zvezde posle prolaska kroz pericentar je vidljiva na slici. Najuočljiviji efekat prolaska je pojava spirale. Međutim, spirala je samo kratkoročna formacija posle prolaska.

Figure 8.
 Spatial distribution of particles after Simulation 6, projected onto the initial orbital plane (X-Y plane). The secondary star enters from the lower left, passes through pericenter at 121 AU right from the star. Direction after passage through peicenter is visible. The most prominent feature of the disk after the encounter is the one-arm spiral. But, that is only a transient feature.

(slika 10 levo). Prvi oblik je mnogo izraženiji pri retrogradnim prolascima i nastaje kao rezultat indirektno sile zvezde iz jednačine kretanja planetezimala javlja se kao velik broj prstenova u samom pojasu (Larwood, Kalas 2001). Nasuprot tome, drugi oblik se javlja samo pri direktnim prolazima, jer je snažno povezan sa pojavom spirale. Javlja se više prstenova, koji su izduženog oblika i istaknutiji su sa strane na kojoj spirala počinje da se grana. Uočavaju se kao grananje iz glavnog dela pojasa. Stvaranje ovih prstenova je rezultat zajedničkog delovanja i direktne i indirektno sile iz jednačine kretanja (Larwood, Kalas 2001). I spiralne i prstenaste strukture su kratkoročne i nestaju usled dinamičke evolucije u pojasu.

Postoji više mehanizama da planetezimali napuste Sunčev sistem usled uticaja zvezdanog prolaska na protoplanetarni disk. Zvezdani prolazak povećava ekscentricitet orbita u pojasu i za vrednosti $e > 1$ objekat više nije gravitaciono vezan za Sunce. Orbite sa većim ekscentricitetima mogu da presecaju Neptunovu putanju i kad se objekat približi planeti na malo rastojanje tada mu Neptun ili smanji orbitalnu energiju, što dovodi do poniranja objekta ka Suncu, ili poveća orbitalnu brzinu i izbaci ga iz pojasa. Ipak, mehanizam koji iznese najviše materijala iz pojasa prilikom prolaska je zarobljavanje planetezimala u orbitu oko sekundarne zvezde (slika 11). Međutim, ovaj proces se javlja samo pri direktnim prolascima i efikasniji je kod prolazaka sa manjim inklinacijama. Na broj zarobljenih čestica najviše utiče udaljenost pericentra (q). Efikasnost zarobljavanja čestica od



Slika 9. Grafici zavisnosti rastojanja perihela planetezimala od srednje udaljenosti od Sunca. Gornji grafik se odnosi na simulaciju 1, a donji grafik na simulaciju 2. Na grafiku su ucrtani i objekti 2000 CR₁₀₅ i Sedna, članovi proširenog rasejanog diska čije orbite može da objasni uticaj bliskog prolaska.

Figure 9. Perihelion distance distribution of planetesimals as a function of a semimajor axis after Simulation 1 (up) and Simulation 2 (down). The positions of Sedna and 2000 CR₁₀₅ are marked, objects in the extended scattered disk whose orbits can be explained by a close stellar encounter.

strane sekundarne zvezde brojčano je izražena u tabeli 2. Samim direktnim zvezdanim prolaskom izbaci se 5-20% čestica iz pojasa, ali taj procenat se poveća preko kasnijih mehanizama prouzrokovanih efektima samog bliskog susreta. Iz tabele 2 može se uočiti da su prolasci sa različitim brzinama (simulacija 1 i simulacija 7) zarobili približno isti broj čestica iz diska. U simulaciji 1 jedino su objekti sa početnom poluosom $a > 47$ AU mogli biti izbačeni iz pojasa (slika 11). Izuzetno jak uticaj zvezde na pojedine planetezimale i velika promena velike poluose ne mora da znači da će se objekat izbaciti iz Sunčevog sistema. Sa slike 11 se vidi da postoji grupa objekata čija se udaljenost od Sunca značajno povećala, a oni su i dalje gravitaciono vezani za Sunce. Svi ti objekti se nalaze u spirali koja se stvori bliskim prolaskom.

Tabela 2. Procenat zarobljenih planetezimala oko sekundarne zvezde u simuliranim prolascima.

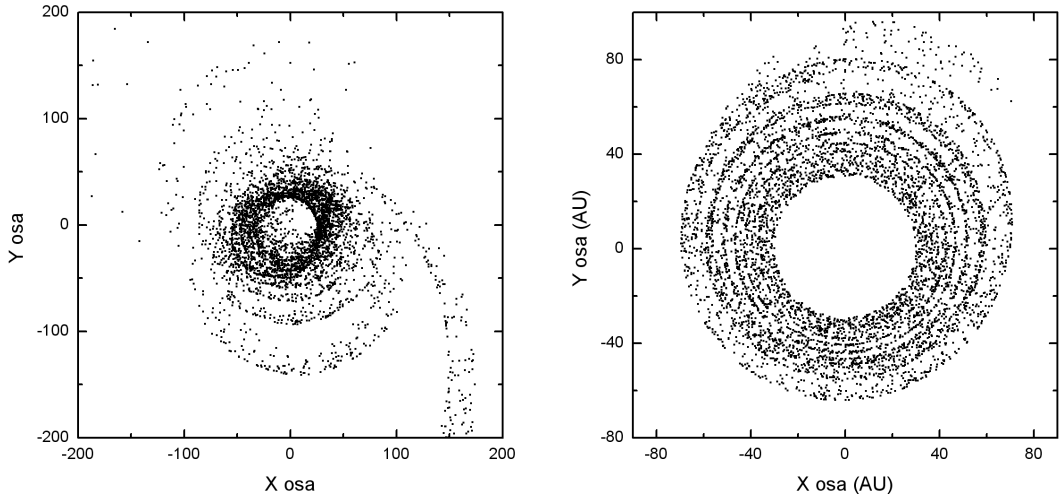
Simulacija	Procenat zarobljenih čestica
1	17
2	10
3	0.2
4	0
5	0
6	22
7	16
8	3

Diskusija

Simulacije su pokazale da bliski zvezdani prolazak u doba formiranja Kojperovog pojasa, dok je Sunce i dalje u početnom zvezdanom jatuu, dovodi do pojava koje mogu da objasne određene dinamičke i strukturne odlike u sadašnjem Kojperovom pojasu.

Simulirani prolasci utiču najintenzivnije na spoljni deo protoplanetarnog diska gde planetezimalima povećaju ekscentricitete i inklinacije do vrednosti koje su slične današnjim. Velike vrednosti tih orbitalnih elemenata u današnjem Kojperovom pojasu nisu mogle nastati tokom formiranja planetezimala u akrecionom disku (Kenyon, Luu 1999), a kao jedan od glavnih mehanizama povećanja ekscentriciteta i inklinacije može se predstaviti bliski zvezdani prolazak, naročito zbog toga što se tokom dalje dinamičke evolucije vrednosti tih elemenata nisu puno promenile (Duncan *et al.* 1995). Do sličnog zaključka je došlo više autora (Ida *et al.* 2000, Kobayashi, Ida 2001; Quillen *et al.* 2004), ali postoje nedoumice da li je efekat bliskog prolaska na prošireni rasejani disk i Ortov oblak konzistentan sa trenutno pretpostavljenim karakteristikama ovih struktura (Levison *et al.* 2004). Raspodele objekata na slici 1 favorizuju objekte sa manjim inklinacijama i objekte na manjim rastojanjima od Sunca što je posledica načina pretrage neba za objektima u Kojperovom pojasu. Kad se to uzme u obzir, dolazi se do zaključka da se, od svih prolazaka, efekti direktnih prolazaka najbolje slažu sa trenutnom distribucijom ekscentriciteta i inklinacija objekata u Kojperovom pojasu.

U unutrašnjem delu planetezimalnog diska (30-40 AU) usled bliskog prolaska vrednosti ekscentriciteta i inklinacije se neznatno povećaju. Ekscentriciteti orbita planetezimala su ispod 0.25. U ovom delu diska, u vremenu posle formiranja Kojperovog pojasa, migracijom Neptuna (Malhotra 1995) se formira rezonantna grupa objekata u Kojperovom pojasu, a uslov



da objekat bude zahvaćen u rezonantno kretanje sa Neptunom je da ima mali ekscentricitet. Na osnovu toga, da bi uopšte bilo moguće stvaranje rezonantnih objekata, bliski prolazak ne sme da poveća ekscentricitete iznad 0.2 objektima na manjim rastojanjima od Sunca (Malhotra *et al.* 2000) što je u skladu sa rezultatima izvršenih simulacija.

Direktni i retrogradni prolasci imaju različite dinamičke uticaje na pojas. Pri retrogradnim prolascima relativna brzina planetezimala i zvezde je velika, jer se tad zvezda kreće u suprotnom smeru od smera kretanja čestica, što za posledicu ima slabiji uticaj na pojas. Pri direktnim susretima brzine zvezde i objekata su slične, tj. vreme delovanja zvezde na jedan objekat je značajno duže, pa je i jačina uticaja veća. Određene strukture u pojasu se javljaju samo prilikom direktnih prolazaka.

Model pokazuje da su strukture u prostornoj raspodeli u pojasu koje nastaju usled uticaja bliskog prolaska veoma izražene neposredno nakon prolaza. Međutim, one nisu očuvane u sadašnjoj raspodeli. Disocijacija ovih oblika moguća je tokom evolucije orbita u pojasu usled spoljnih uticaja jata i galaksije, ali i zbog međusobnog delovanja među planetezimalima. Razilaženje planetezimala iz spirale oko diska se uočava već nakon ≈ 10 orbitalnih perioda usled fazne razlike orbita objekata u spirali (Kalas *et al.* 2000).

Karakteristične raspodele longitude uzlaznog čvora i argumenta perihela nastale prilikom bliskog prolaska nisu konzistentne sa trenutnim posmatranjima. Ovo neslaganje se objašnjava kasnijim promenama tih orbitalnih elemenata u dinamičkoj evoluciji dugoj četiri milijarde godina, usled delovanja među samim objektima i gravitacionog uticaja velikih planeta, prvenstveno rezonantnog uticaja (Malhotra *et al.* 2000).

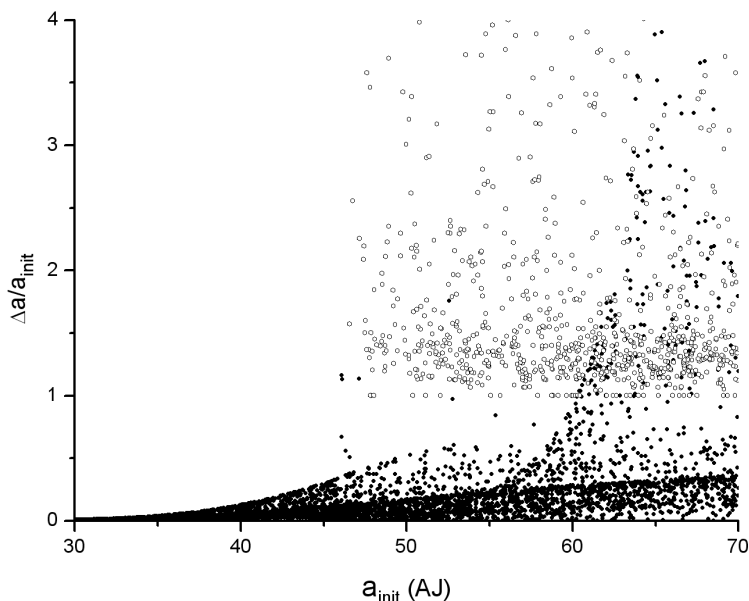
Nastanak ivice klasičnog pojasa zahteva veoma snažan proces koji će dovoljno jako delovati na spoljni deo planetezimalnog diska, a na manjim

Slika 10.

Prostorna raspodela objekata na X-Y ravan posle simulacije 6 (levo) i simulacije 5 (desno) na kojima se uočavaju strukture u pojasu nastale bliskim zvezdanim prolaskom.

Figure 10.

Spatial distribution of particles after a companion encounter, projected onto the initial orbital plane (X-Y plane) viewed 2000 years after the pericenter of an encounter for a prograde (left, Simulation 6) and a retrograde encounter (right, Simulation 5). There are visible structures that were created during an encounter.



Slika 11.
Grafik zavisnosti
relativne promene
velike poluose
objekata od početnih
vrednosti velike
poluose za simulaciju
1. Praznim kružićima
su predstavljeni
objekti izbačeni iz
pojasa (koji više nisu
gravitaciono vezani
za Sunce), a punim
kružićima objekti
ostali u pojasu.

Figure 11.
Distribution of the
relative change of the
semimajor axis as a
function of the
original semimajor
axis after Simulation
1. Objects ejected
from the disk are
marked with empty
circles, objects that
remained in the disk
are marked with
filled circles.

rastojanjima delovati silom koja neće izazvati velike promene orbita objekata da se ne bi razorio ceo disk. Perturbacije dovoljno jake da odseku protoplanetarni disk na ≈ 50 AU mogu da se objasne direktnim bliskim prolaskom zvezde. Na većim rastojanjima od Sunca promene su veće i pojas je sve ekscitovaniji sve do regiona gde se većina objekata izbaci i gde nastaje spoljna ivica diska. Ivica koja nastaje direktnim prolaskom je izrazitija ako orbita zvezde ima manju inklinaciju i najizraženija je pri direktnom koplanarnom prolasku. Granica diska dobijena odmah nakon prolaska nije konačna, jer posle toga na nju treba da deluju kasniji indirektni procesi izazvani samim zvezdanim prolaskom. Planetezimali sa vrednostima ekscentriciteta $e > 0.4$ presecaju Neptunovu putanju tako da se posle određenog vremena izbace iz pojasa (Levison *et al.* 2004). Tela sa ovako velikim ekscentricitetima ima najviše blizu spoljne ivice, usled čega ovaj mehanizam dodatno smanjuje udaljenost granice pojasa. Visoka srednja vrednost ekscentriciteta dovodi do velike disperzije brzine u spoljnom delu diska, koja uzrokuje da sudari među objektima postanu jači (Ohtsuki *et al.* 1993). Ovo dovodi do remećenja akrecije planetezimala koja u ovom delu pojasa postaje usporena, pa čak i prekinuta (Kobayashi, Ida 2001), dok se u unutrašnjem delu diska akrecija normalno odvija (Ida *et al.* 2000). Ova dva mehanizma u dobu posle zvezdanog susreta dovode do stvaranja još izraženije ivice na udaljenosti ≈ 50 AU od Sunca, što je u skladu sa rezultatima simuliranih prolazaka, prvenstveno direktnog prolaska sa inklinacijom $i = 0^\circ$, a što se slaže i sa trenutnim posmatranjima.

Postojeći modeli formiranja Kojperovog pojasa pokazuju da bi prvobitni disk u kojem su posmatrani objekti nastali trebalo da sadrži $\approx 10 M_\oplus$

(M_z – masa Zemlje) materijala, ali trenutno u regionu Kojperovog pojasa ima samo $\approx 0.1 M_z$ (Trujillo, Brown 2001). Jedan od mogućih mehanizama smanjivanja mase jeste svakako blizak zvezdani prolazak. Zvezdanim prolaskom se u pojasu izbacuje deo mase diska putem više efekata. Prvo, direktnim izbacivanjem hiperboličnom putanjom usled snažnog gravitacionog uticaja zvezde i potom zarobljavanjem čestica u orbitu oko zvezde koja prolazi se izbaci 5-20% planetezimala iz diska. Drugo, blizak prolazak povećava i disperziju brzina, pa se zbog intenzivnih sudara među planetezimalama stvore velike količine prašine koja se izbaci iz pojasa (Stern 1995) usled pritiska zračenja, sunčevog vetra i Pointing-Robertsonovog efekta. I na kraju, u smanjivanju mase diska sudeluje i Neptun koji izbacuje objekte sa velikim ekscentricitetima. Neptun učestvuje u smanjivanju mase bez obzira na bliski prolazak, ali je ovaj mehanizam intenzivniji posle bliskog prolaska zbog generalnog povećanja ekscentriciteta objektima planetezimalnog diska. U celini, bliskim prolaskom može da se izbaci značajna količina materijala i to bi moglo da bude jedan od najjačih procesa smanjivanja mase iz Kojperovog pojasa. Procenjuje se da je moguće smanjiti masu planetezimalnog diska za oko 50% (Malhotra *et al.* 2000).

Blizak zvezdani prolazak bi mogao objasniti prilično “ekstremne” orbite nekih tela u tzv. proširenom rasejanom pojasu. Ti objekti imaju veoma velike srednje udaljenosti od Sunca i vrlo izdužene putanje. Međutim, perihel im je na velikom rastojanju tako da se ne približavaju Neptunu. Trenutno je poznato 5 ovakvih objekata, a najinteresantniji su 2000 CR₁₀₅ i Sedna. Njihov veliki ekscentricitet ukazuje da im je putanja formirana pod gravitacionim uticajem nekog tela, ali nije jasno koji im je objekat promenio putanju i udaljio ih iz pojasa s obzirom na to da nisu pod uticajem Neptuna. Objekti u spiralnoj strukturi diska imaju veoma slične orbitalne elemente sa objektima u proširenom rasejanom disku (slika 10), tako da je na orbite tih udaljenih objekata mogla uticati zvezda koja je prošla pored planetezimalnog diska.

U slučaju kada primarna zvezda pripada binarnom sistemu najverovatnije dolazi do više prolazaka. U ovom slučaju pojedinačni prolasci bi imali slične parametre, tako da bi se ekscentriciteti i inklinacije povećavali svakim susretom. Ukupni efekti bi bili slični, samo možda jače izraženi u odnosu na pojedinačan prolazak.

Poznato je više primera mladih zvezda i njihovih cirkumstelarnih diskova koji svojom strukturom ukazuju na efekte bliskog zvezdanog prolaska. Spiralna struktura i asimetrija sistema HD 141569A pokazuje da je ekscitovan zvezdom HD 141569B sa kojom čini binarni sistem (Augereau, Papaloizou 2004). Spiralni oblik diska oko zvezde HD 100546 je verovatno nastao bliskim prolaskom pericentra na oko 500 AU (Grady *et al.* 2001). Larvod i Kalas (2001) su ukazali da je asimetrija i prstenasta struk-

tura protoplanetarnog diska oko zvezde Beta Pictoris prouzrokovana bliskim zvezdanim prolaskom, što je potvrđeno i numeričkim simulacijama kojima je pokazano da ovakve strukture nastaju u spoljnim delovima diska koji je snažno perturbovan.

Bliski zvezdani prolazak je uglavnom predstavljan kao događaj razoran po planetarne sisteme u nastajanju. Međutim, skorašnji razvoj u teoriji formiranja zvezda i u posmatranjima pokazuje da se bliski prolasci mogu predstaviti kao sastavni deo procesa formiranja zvezda i planeta, što je prikazano i u ovom radu.

Zaključak

Efekte bliskog zvezdanog prolaska na pojedine karakteristike planetezimalnog diska su konzistentni sa posmatranim odlikama sadašnjeg Kojperovog pojasa. Bliski prolazak daje objašnjenje za glavne karakteristike Kojperovog pojasa – oštru spoljnu ivicu i raspodele ekscentriciteta i inklinacija, kao i mogući odgovor na gubitak mase i karakteristike orbita u proširenom rasejanom pojasu.

Spoljašnja ivica diska na približno 50 AU se stvara direktnim prolascima. Ona postaje još izraženija usled kasnijih indirektnih efekata izazvanih zvezdanim prolaskom, čime se stvara veoma nagla spoljna granica slična onoj koju danas vidimo u Kojperovom pojasu. Zvezdani prolazak dobro objašnjava i velike ekscentricitete i inklinacije dela populacije pojasa, a male promene tih elemenata u unutrašnjem delu diska dozvoljavaju stvaranje rezonantne grupe objekata kasnijim uticajem Neptuna. Procesima prouzrokovanim zvezdanim prolaskom se izbacilo i znatan deo materijala iz planetezimalnog diska, što bi mogao biti jedan od najintenzivnijih mehanizama smanjivanja mase pojasa koji su smanjili masu pojasa za oko 100 puta do vrednosti slične današnjoj. Pored toga, prilikom bliskog prolaska nastaju orbite slične orbitama objekata u proširenom rasejanom disku, pa se ovim procesom može objasniti njihovo poreklo, s obzirom na to da ne postoji objekat u trenutnom okruženju koji može svojim uticajem izbaciti te objekte u takve izdužene orbite.

Određene karakteristike Kojperovog pojasa se ne podudaraju sa karakteristikama dobijenim modelom zvezdanog prolaska, prvenstveno neizotropnost raspodele longitude uzlaznog čvora. Ako se prihvati ovaj scenario, za njihovo objašnjenje moraju se pretpostaviti kasniji uticaji na pojas.

Za objašnjenje svih razmatranih karakteristika potreban je direktan prolazak sa manjom inklinacijom, jer ostali prolasci ne daju dovoljnu sličnost perturbovanih osobina sa osobinama današnjeg pojasa. Direktan koplanarni prolazak dobro objašnjava sve odlike, sem povećanja inklinacije zbog čega je potrebna nagnutost orbite sekundarne zvezde u odnosu na ravan planetezimalnog diska.

Literatura

- Adams F.C. and Laughlin G. 2001. Constraints on the birth aggregate of the Solar System. *Icarus*, **150**: 151.
- Augereau J.C. and Papaloizou J.C.B. 2004. Structuring the HD 141569A circumstellar dust disk – Impact of eccentric bound stellar companions. *Astronomy and Astrophysics*, **414**: 1153.
- Brown M. 2001. The inclination distribution of the Kuiper belt. *Astronomical Journal*, **121**: 2804.
- Duncan M.J., Levison H.F. and Budd S.M. 1995. The dynamical structure of the Kuiper belt. *Astronomical Journal*, **110**: 3073.
- Edgeworth K.E. 1943. The evolution of our planetary system. *Journal of the British Astronomical Association*, **20**: 181.
- Grady C.A., Polomski E.F., Henning Th., Stecklum B., Woodgate B.E., Telesco C.M. *et al.* 2001. The Disk and Environment of the Herbig Be Star HD 100546. *Astronomical Journal*, **122**: 3396.
- Ida S., Larwood J. and Burkert A. 2000. Evidence for early stellar encounters in the orbital distribution of Edgeworth–Kuiper belt objects. *Astrophysical Journal*, **528**: 351.
- Jewitt D. and Luu J. 1993. Discovery of the candidate Kuiper belt object 1992 QB1. *Nature*, **362**: 730.
- Kalas P., Larwood J., Smith B.A. and Schultz A. 2000. Rings in the planetesimal disk of β Pictoris. *Astrophysical Journal*, **530**: 133.
- Kenyon S.J. and Luu J.X. 1999. Accretion in the early Kuiper belt: II. Fragmentation. *Astronomical Journal*, **118**: 1101.
- Kobayashi H. and Ida S. 2001. The effects of a stellar encounter on a planetesimal disk. *Icarus*, **153**: 416.
- Kuiper G. 1951. On the origin of the Solar System. In *Astrophysics: A Topical Symposium* (ed. J.A Hynek). New York: McGraw-Hill, pp. 357–414.
- Larwood J.D. and Kalas P. G. 2001. Close stellar encounters with planetesimal disks: The dynamics of asymmetry in the β Pictoris system. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **323**: 402.
- Laughlin G. and Adams F.C. 1998. The modification of planetary orbits in dense open clusters. *Astrophysical Journal*, **508**: L171.
- Levison H.F., Morbidelli A. and Dones L. 2004. Sculpting the Kuiper Belt by a stellar encounter: Constraints from the Oort cloud and Scattered disk. *Astronomical Journal*, Submitted. dostupno na http://www.boulder.swri.edu/~hal/PDF/passing_star.pdf
- Luu J.X. and Jewitt D.C. 2002. Kuiper belt objects: Relics from the accretion disk of the Sun. *Annual Review of Astronomy & Astrophysics*, **40**: 63.
- Malhotra R. 1995. The origin of Pluto's orbit: implications for the Solar System beyond Neptune. *Astronomical Journal*, **310**: 420.
- Malhotra R., Duncan M. and Levison H. 2000. Dynamics of the Kuiper Belt. In *Protostars and Planets IV* (ed. V. Mannings, A. Boss, S. Russell). Tucson: University of Arizona Press, pp. 1231-1254.
- Morbidelli A. 2002. Modern Integrations of Solar System Dynamics. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, **30**: 89.

- Ohtsuki K., Ida S., Nakagawa Y. and Nakazawa K. 1993. Planetary accretion in the solar gravitational field. In *Protostars and Planets III* (ed. E. H. Levy and J. Lunine), Tucson: University of Arizona Press, pp. 1089–1107.
- Ostriker E.C. 1994. Capture and induced disk accretion in young star encounters. *Astrophysical Journal*, **424**: 292.
- Quillen A.C., Trilling D.E. and Blackman E.G. 2004. The impact of a close stellar encounter on the Edgeworth-Kuiper Belt. *Astronomical Journal*, Submitted. dostupno na http://arxiv.org/PS_cache/astro-ph/pdf/0401/0401372.pdf
- Press W.H., Teukolsky S.A., Vetterling W.T. and Flannery B.P. 1997. *Numerical recipes in C*. Cambridge: Cambridge University Press
- Safronov V. S. 1969. *Evolution of the Protoplanetary Cloud and Formation of the Earth and Planets*. Moscow: Nauka
- Stern S.A. 1995. Collisional time scales in the Kuiper disk and their implications. *Astrophysical Journal*, **110**: 856.
- Trujillo C.A. and Brown E. 2001. The radial distribution of the Kuiper belt. *Astrophysical Journal*, **554** (1): L95.
- Weissman P.R. 1998. Stellar Perturbations of the Kuiper Belt. *Bulletin of the American Astronomical Society*, **30**: 1113.

Bojan Sič

Effects of a Close Stellar Encounter on the Dynamical Characteristics of the Kuiper Belt

In this paper the effect of a close stellar encounter on the Kuiper Belt has been numerically investigated. It is considered that a solar mass star passed near the Solar system in the time of the formation of the Kuiper Belt, with perihelion on the order of 100-200 AU. A series of numerical simulations of the stellar encounters with various parameters has been performed. It started with a disk containing 6000 massless test particles (planetesimals) on circular, coplanar orbits uniformly distributed around the Sun between 30 and 70 AU. The orbital changes of the test particles were integrated using a fourth-order Runge-Kutta scheme with adaptive step-size. It was found that the effects of a stellar encounter on some characteristics of the planetesimal disk are consistent with observed features of the Kuiper Belt. A prograde encounter can more effectively perturb the disk because the influence effectively lasts longer in the same direction rotating with each planetesimal. Low inclination prograde encounters can produce the resulting planetesimal distribution containing both excited objects with high eccentricities or high inclination as well as low eccentricity and low inclination objects, similar to what is seen in the Kuiper Belt. Low eccen-

tricity objects remain in the disk following the encounter, which implies that a population which can be captured into resonance by subsequent migration of the Neptune remains. The close stellar encounter can explain an abrupt edge of the classical Kuiper Belt. Low inclination, prograde encounter with a perihelion 120 AU produces a distinct edge of the planetesimal disk at 50 AU, but this edge would become more abrupt due to secondary effects of the stellar encounter. Due to the high velocity dispersion produced by stellar encounter, planetesimals in the region exterior to 50 AU would collisionally grind themselves to dust, while objects still could have formed in the inner regions. Secondary effects of the stellar encounter could also be responsible for mass depletion of the primordial Kuiper Belt. Low inclination prograde encounters removed $\approx 15\%$ of the planetesimals in the disk, but with the later effects the close stellar encounters could be responsible for ejecting of $\approx 50\%$ of the objects. A prominent feature in the spatial distribution is an inclined one-armed spiral. Planetesimals in this feature have orbits with high eccentricities and high perihelion distances like asteroids in the extended scattered disk of the Kuiper Belt. Therefore the stellar encounters can explain the origin of those “extreme” orbits. Results of the simulation showed that only a low inclination prograde close stellar encounter can explain the present characteristics of the Kuiper Belt.

