



UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI
FAKULTET
DEPARTMAN ZA FIZIKU



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ
ПРИРОДНО-МАТЕМАТИЧКИ ФАКУЛТЕТ

ПРИМЉЕНО:	29.06.2009
ОРГАНИЗ.ЈЕД.	БРОЈ
0603	9/708

Perturbacije i zarobljavanje kometskih objekata zvezdanim prolaskom i uticaj na planetarni sistem

- diplomski rad -

Mentor:

Prof. dr. Slobodan
Ninković

Autor:

Bojan Sič

Novi Sad, jun 2009. godine

Sadržaj

Abstract.....	5
Kajperov pojas	7
Struktura Kajperovog pojasa.....	8
Rezonantni objekti.....	8
Klasični objekti.....	10
Rasejani disk	10
Rasejani prošireni disk.....	11
Povezanost sa drugim telima Sunčevog sistema.....	11
Pluton-Haron i Triton	11
Komete i Kentauri	11
Proučavanje	12
Zagonetke.....	12
Ortov oblak	13
Podela	13
Dugo-periodične komete.....	14
Uticaji na oblak	15
Karakteristike oblaka.....	16
Formiranje i popunjavanje oblaka.....	17
Popunjavanje	17
Forniranje	19
Zvezdani prolasci	20
Poreklo vode na Zemlji	21
Model simulacije i integrator.....	23
Rezultati.....	28
Diskusija	43
Zaključak	52
Reference i Literatura.....	54
Prilog (kod integratora)	59



Perturbations and capture of comets by a stellar encounter and its effect on the Solar system

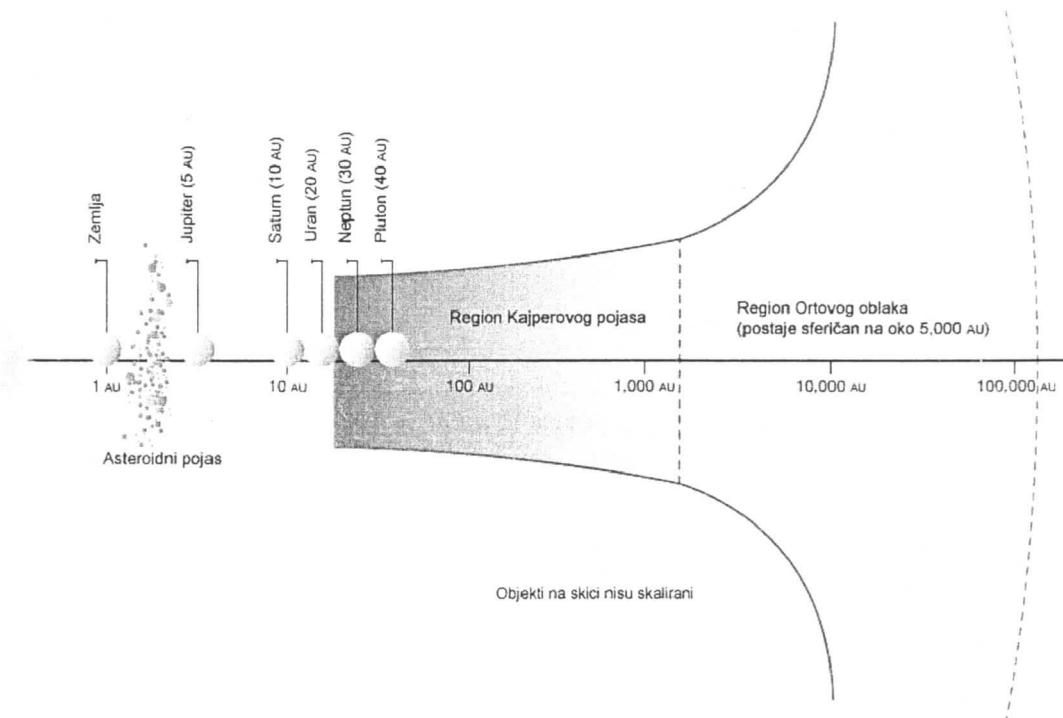
Abstract

In this paper the effect of a close stellar encounter on the Kuiper Belt, the Oort cloud, and the inner planetary system, has been numerically investigated. It is considered that a solar mass star passed near the Solar system, in the time of formation of planets, the Kuiper Belt and the Oort cloud with perihelion on the order of 100-400 AU. A series of numerical simulations of the stellar encounters with various parameters have been performed. They are started with a disk containing six to ten thousand massless test particles (planetesimals) on circular, coplanar orbits uniformly distributed around the Sun between 30 and 70 AU (inner disk) for one group of simulations, and between 250 and 500 AU (outer disk) for the second group of simulations. The orbital changes of the test particles are integrated using a fourth-order Runge-Kutta scheme with adaptive step-size. It was found that the effects of a certain stellar encounter on some characteristics of the planetesimal disk are consistent with observed features of the Kuiper Belt, and also Oort cloud, about which much less data is known. 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 eccentricity objects remain in the disk following the encounter, which implies that a population which can be captured into resonance by subsequent migration of Neptune remains. The close stellar encounter can explain an abrupt edge of the classical Kuiper Belt. A low inclination prograde encounter with a perihelion of ≈ 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. The stellar encounter could also be responsible for mass depletion of the primordial protoplanetary disk. Low inclination prograde encounters removed $\sim 15\%$ of the planetesimals in the inner disk, and about $\sim 50\%$ in the outer disk, but with the later effects close stellar encounters could be responsible for ejecting an even larger fraction of the primordial planetesimal disk. Many of these objects could be transferred to the Oort cloud. Simulations showed that such stellar encounters could be a main mechanism for transferring planetesimals in the Oort cloud. That could be directly, by giving large values of aphelion to the objects, or indirectly, by sending a much larger number of objects to the influence of Neptune, and other planets, which otherwise part of them wouldn't come near a planetary region. Many objects are ejected from the Solar system and they became interstellar comets. Also some objects could change stellar system, when a secondary star captures them. A prominent feature in the spatial distribution after an encounter 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. So the stellar encounters can explain the origin of those "extreme" orbits. Also some objects with high eccentricity orbits could come near the Sun and their possible influence on the inner planetary system and the planet Earth (in terms of the origin of water) is evaluated. Results of simulations showed that only a low inclination prograde close stellar encounter can explain the present characteristics of the Kuiper Belt and Oort cloud.

Kajperov pojас

Sredinom prošlog veka veći broj naučnika je spekulisalo o mogućem postojanju objekata iza planetskog regiona. Razmišljanjem o poreklu kratko-periodičnih kometa irski aristokrata Kenet Edžvort (Kenneth Edgeworth) je 1943. došao na zamisao da one potiču iza Plutona (Edgeworth 1943) – ideja koja je danas opšte prihvaćena. Američki astronom holandskog porekla Džerard Kajper (Gerard Kuiper) je 1951. pretpostavio postojanje pojasa manjih objekata iza Plutona, kasnije spekulijući da bi to mogla biti i planeta (Kuiper 1951). Međutim, još ranija pisanja Leonarda (Leonard) govore da je on 1930. god. prilikom otkrića Plutona pravilno spekulisao da bi Pluton mogao biti samo prvi objekat koji je pronađen na udaljenosti većoj od Neptunove (Leonard 1930).

Zašto su ovi naučnici pretpostavili postojanje pojasa objekata ovako daleko od Sunca? Koja je bila njihova osnovna ideja? Cirkumstelarni akrecioni diskovi su posmatrani oko velikog broja drugih zvezda i to se smatra za osnovni put nastanka zvezda i planeta oko njih. Planete i manji objekti nastanu iz gase i praštine koja se nalazi u disku oko protozvezde. Ipak, taj proces nije stoprocentno efikasan. Planete mogu da nastanu samo iz dela diska gde ima dovoljno materijala za njih. Gustina materijala u akrecionom disku se smanjuje postepeno kako se udaljavamo od Sunca. U spoljnim delovima protosunčevog diska gde nije bilo dovoljno materijala za planete stvorili su se manji objekti, asteroidi Kajperovog pojasa.



Slika 1- Skica Sunčevog sistema koja pokazuje koliki je region planeta mali u odnosu na prostor u kojem se nalaze Kajperov pojас i Ortov oblak. Sistem je predstavljen u logaritamskoj skali

Prvi direktni posmatrački dokaz za ovaku populaciju objekata dobijen je otkrićem 1992 QB1, prvog poznatog objekta u Kajperovom pojasu (Jewitt & Luu 1993). Pre ovog otkrića teorije o postojanju “kometskog pojasa” iza Neptuna se često smatrane za teoretski moguće, ali u

isto vreme i spekulativne iako nije postojao ubedljiv razlog zašto bi se formiranje planetoida zaustavilo kod Plutonove orbite. Ovaj pojas, kako je danas poznato, sadrži velik broj malih tela koja orbitiraju na samoj ivici Sunčevog sistema, iza putanje Neptuna. Usled velikog rastojanja od Sunca asteroidi u Kajperovom pojusu imaju jako mali prividni sjaj (prividna magnituda $m > 19$) pa se izuzetno teško otkrivaju i detektuju. Posle više sistematskih pretraga, trenutno je poznato 1342 objekata u pojusu (maj 2009)¹.

Kajperov pojas nam daje najbolje i možda jedine podatke o tome šta se dogadalo u poslednjim fazama formiranja Sunčevog sistema. Najvažnija veličina je raspodela preostalih objekata u pojusu koja je nastala pod stalnim gravitacionim uticajem velikih planeta. Proučavajući ovu raspodelu saznajemo koji su procesi uticali na formiranje planeta i uobičili spoljašnji deo Sunčevog sistema (Jupiter i sve udaljenije planete). Međutim, postoji još jako puno nepoznanica o Kajperovom pojusu i procesima koji su ga obrazovali.

Iako se objekti u Kajperovom pojusu teško detektuju, oni su po veličini poprilično veliki, sa prečnicima čak i preko 1000 km. Do sada najveći pronađeni objekti u ovom pojusu su (136108) Haumea, (136472) Makemake i (136199) Erida koje imaju prečnike od približno 1500 km, 1600 km i 2400 km respektivno. Prečnik Plutona iznosi 2300 km. Iz ovog se vidi da pozajemo asteroide Kajperovog pojasa koji imaju približnu masu i veličinu Plutona s tim da je Erida objekat koji je i veći i masivnije od samog Plutona. Takođe više najveći asteroidi u Sunčevom sistemu nije Cerera (975 km) već su tu titulu preuzezeli asteroidi koji se nalaze iza Neptuna. Verovatno u tim udaljenim delovima Sunčevog sistema ima i većih objekata i od Plutona i od Eride (Brunini & Melita 2002). Zbog svega rečenog je u prošloj deceniji sa pravom pokrenuta debata da li je Pluton planeta ili je to samo najveći asteroid u pojusu, jer on i po fizičkim odlikama a i karakteristikama orbite izgleda samo kao objekat u Kajperovom pojusu, pogotovo posle pronađaska Eride. I zaista, Međunarodna astronomska unija (IAU) je na godišnjoj skupštini 24. avgusta 2006. godine u Pragu donela odluku² da se Plutonu oduzme status planete, i od tada je on član nove klase objekata – patuljastih planeta. Pored Plutona još 4 objekta ovaj status: Cerera, Haumea, Makemake i Erida.

Struktura Kajperovog pojasa

Današnja struktura Kajperovog pojasa (Luu & Jewitt 2002) je formirana pod intenzivnim gravitacionim uticajem velikih planeta, prvenstveno Neptuna. Preko karakteristika orbita asteroidi u Kajperovom pojusu su podeljeni u četiri dimaničke grupe: (a) klasične, (b) rezonantne, (c) rasejane objekte i (d) objekte u proširenom rasejanom disku. Ipak, granice između ovih grupa objekata nisu toliko čvrsto definisane.

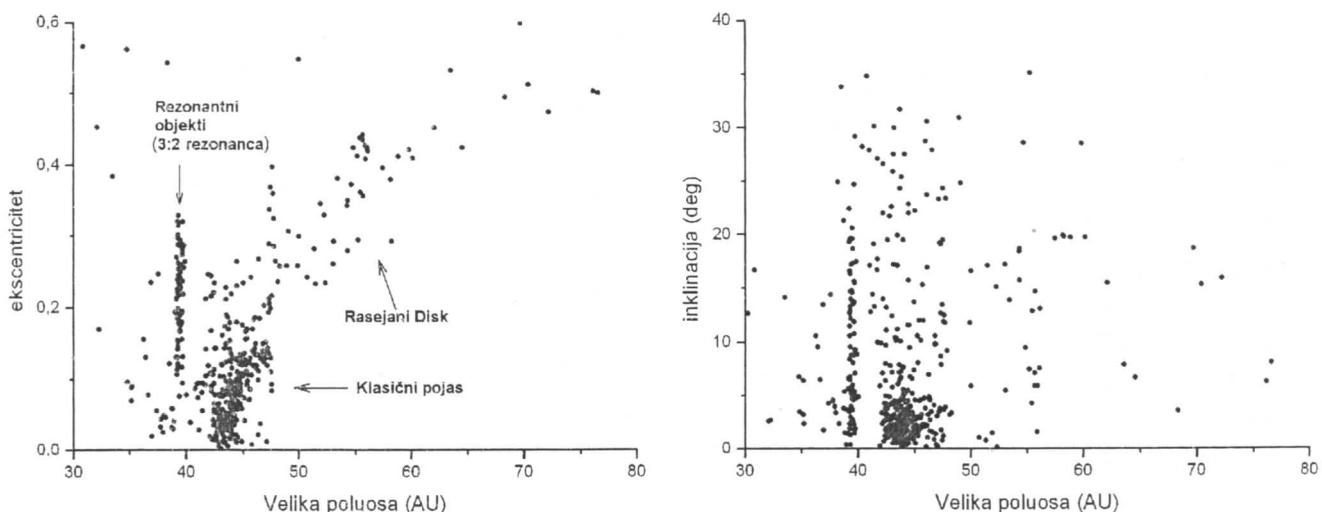
Rezonantni objekti

Najbliži Neptunu od svih objekata u pojusu su rezonantni objekti (slika 1). Oni se nalaze u rezonanci sa Neptunom, tj. odnos Neptunovog i njihovog orbitalnog perioda je ceo broj.

¹ Redovno ažurirane liste pronađenih objekata u Kajperovom pojusu nalaze se na web adresama: <http://cfa-www.harvard.edu/iau/lists/TNOs.html> i <http://cfa-www.harvard.edu/iau/lists/Centaurs.html>

² Originalni tekst rezolucije usvojen na godišnjoj skupštini Međunarodne astronomske unije 2006. godine u Pragu se može naći na adresi http://www.iau.org/public_press/news/release/iau0603/

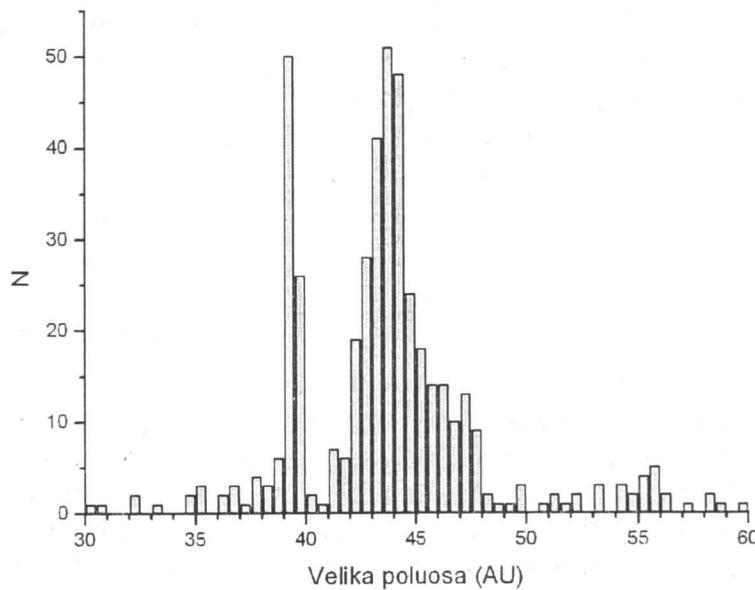
Najbrojnija je 3:2 rezonanca, koja se nalazi na 39.4 AJ (AJ - astronomска јединица, tj. udaljenost Sunce-Zemlja) od Sunca na samoj unutrašnjoj ivici pojasa (Slika 1). U ovoј rezonanci se nalazi i Pluton (zbog toga se оvi objekti nazivaju i Plutini), tj. dok Neptun načini tri obrtaja oko Sunca, Pluton i Plutini se obrnu dva puta. Preko ovih objekata mi smo saznali dosta o velikim planetama u vreme najmladih dana Sunčevog sistema. Naime, mehanizam koji je dovukao ove objekte u rezonantne orbite je radikalno pomeranje (migracija) velikih planeta. Tokom završnih faza formiranja planeta velike planete radikalno su se pomerale usled razmene momenta impulsa sa malim objektima čije su putanje često skretane prilikom približavanja nekoj od velikih planeta. Ta razmena impulsa za vreme čišćenja diska dovela je do udaljavanja Saturna, Urana i Neptuna i blagog približavanja Suncu masivnog Jupitera. Kako se Neptun udaljavao i kretao kroz protoplanetarni disk uhvatilo je Plutona i ostale Plutine u 3:2 rezonancu. Objekti su hvatani i u druge rezonance, ali ipak sa manjom efikasnošću. Neptun se pri ovom mehanizmu udaljio od Sunca za čak oko 10 AJ.



Slika 2 – Orbitalna raspodela ekscentriciteta i inklinacija objekata u Kajperovom pojusu u zavisnosti od velika poluose objekata. Ucrtani su samo objekti koji su posmatrani tokom više opozicija (Minor Planet Center).

Februara 2004. godine otkriven je objekat (90482) Orkus. Na osnovu sjaja, i pretpostavljenog albeda procenjuje se da ima prečnik od oko 1500 km. Svega za trećinu manji od Plutonovog. Kao i Pluton, i ovaj objekat je u 3:2 rezonanci sa Neptunom. Prvi snimci ovog objekata su načinjeni još 1951. i 1954. na kojima tad nije razlikovan od ostalih zvezda, ali na osnovu kojih je dosta precizno izračunata orbita koja jako podseća na Plutonovu. Velika poluosa je na 39.5 AJ, inklinacija (agnutost putanje u odnosu na planetarnu ravan Sunčevog sistema) iznosi 20.6° , što je malo veća od Plutonove. Orkus načini jednu orbitu oko Sunca za 248 godina. Najdalje od Sunca je bio 1989., i od tad se polako približava Suncu do 2113. godine kad će biti u perihelu. Svi asteroidi u Kajperovom pojusu su male gustine, jer su uglavnom sastavljeni od leda za razliku od stenovitih asteroida između Marsa i Jupitera. Međutim i pored male gustine, masa Orkusa je gotovo ista kao i masa celokupnog glavnog asteroidnog pojasa u unutrašnjem delu planetarnog sistema (oko 5% mase Meseca).

Klasični objekti



Slika 3 – Broj objekata u Kajperovom pojusu raspoređenih po velikoj poluosu (Minor Planet Center, oktobar 2004.). Ivica klasičnog Kajperovog pojasa se uočava na 48 AJ.

Klasični objekti (slika 1) su trenutno najbrojniji u Kajperovom pojusu i nalaze se na $a = 35 - 48$ AJ od Sunca tako da nisu pod tako snažnim uticajem Neptuna kao rezonatni objekti. U tom delu Kajperovog pojasa razlikujemo dve vrste asteroida koji se razlikuju i po karakteristikama orbita i po boji. Jedan deo objekata ima veće inklinacije i ekscentricitete i crveniji su od drugog dela klasičnih objekata. Nerazjašnjeno je pitanje koja su to dva različita mehanizma čijim delovanjem su ova nebeska tela dospela do različitih položaja i fizičkih karakteristika u klasičnom pojusu. Enigmatična karakteristika ovog dela pojasa je i pojava iznenadne i oštре gornje granice klasičnog pojasa na 48 AJ. Nepoznato je što tako naglo iza te udaljenosti nema više klasičnih objekata. Tačna lokacija bi mogla biti rezultat dugotrajnog delovanja Neptuna, ali samo poreklo ivice je nepoznato. A još jedna zagonetka koju nam daje klasični pojus je činjenica da on sadrži ukupno oko 10% mase Zemlje, a poznato je da je neophodno bar 100 puta više mase da bi gravitacionim privlačenjem nastali objekti sa prečnicima od preko 1000 kilometara. Ne zna se na koje načine je toliko velika masa mogla da se izbaci iz pojasa.

Rasejani disk

Nasuprot njima, rasejani objekti (slika 2) se nalaze na većim udaljenostima, jer su im poluose veće od 48 AJ, ali imaju veoma ekscentrične putanje tako da se veoma približe Neptunu kad su najbliže Suncu. Odavde se zaključuje da su to ustvari objekti koje je Neptun izbacio na ove udaljene orbite. Do sada nije otkriven velik broj rasejanih objekata prvenstveno zbog njihove ogromne udaljenosti od Sunca i činjenice da postanu dovoljno sjajni za otkrivanje samo tokom malog dela putanje kada se nalaze najbliže Suncu, ali se pretpostavlja da su ovi objekti veoma brojni. Oni su najverovatnije i najveći izvor kratkoperiodičnih kometa jer pošto imaju perihel vrlo blizu Neptunove putanje, on može lako da im promeni putanju ka unutrašnjosti Sunčevog

sistema (vidi "Komete i Kentauri") gde će početi kometska aktivnost kako raste površinska temperatura na ovim nebeskim telima.

Rasejani prošireni disk

Najudaljeniji objekti u Sunčevom sistemu koje trenutno poznajemo su objekti u proširenom rasejanom disku. Imaju jako izdužene orbite i veoma udaljene velike poluose. Ovi objekti su vrlo zagonetni. Kad se nalaze najbliže Suncu, u perihelu, oni su toliko udaljeni od planeta da na njih Neptun gotovo nema nikakav uticaj. Pa je zato nepoznato kako su oni pospeli na takve orbite. 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 velikih planeta. Pored toga oni su na ogromnim udaljenostima od nas, tako da ih možemo videti samo kad su u blizini perihela. Zbog toga su nam do sada poznati samo 5 ovakvih tela, iako ih na udaljenostima na više od 6 milijardi kilometara ima velik broj (neke procene idu dotle da ima ih više nego objekata u klasičnom delu pojasa). Najinteresantniji su 2000 CR₁₀₅ sa velikom poluosom $a = 230$ AJ i već pominjana Sedna, kojoj treba da jednoim obide oko Sunca čak 12260 godina, dok joj je prosečno rastojanje od Sunca čak $a = 531$ AJ. Sedna, kad je naudaljenija od Sunca (990 AJ), već se nalazi u unutrašnjem delu Ortovog oblaka. A kad je najbliža Suncu, nalazi se na udaljenosti od 74 AJ, veoma daleko od Neptuna koji je na "samo" 30 AJ.

Sedna je, posle Marsa, najcrveniji veći objekat u Sunčevom sistemu što je pokazao Spitzer teleskop. To je posledica iradijacije Sednine površine duge više od 4 milijarde godina. Kada led koji sadrži ugljenik prima visoko-energetske čestice koje preovlađuju u međuplanetarnom prostoru, kao što su kosmički zraci i čestice solarnog vетра, stvori se čvrst sloj bogat složenim ugljeničnim jedinjenjima koji je crvenkaste boje. Što je objekat duže izložen iradijaciji bez sudara, to će njegova površina biti crvenija. Sedna se nalazi na ogromnoj udaljenosti gde su susreti među telima jako retki, tako da verovatno nije doživela sudar sa drugim telom posle izbacivanja na ovu orbitu što je razlog njene crvene boje.

Povezanost sa drugim telima Sunčevog sistema

Pluton-Haron i Triton

Veza dvojnog sistema Pluton-Haron sa Kajperovim pojasmom je već spominjana. Po fizičkim karakteristikama ta dva objekta su samo dva najveća asteroida u Kajperovom pojusu. A po svojim fizičkim karakteristikama i sličnosti sa Plutonom i Neptunov satelit Triton bi se mogao povezati sa objektima Kajperovog pojasa. Prema takvoj slici Pluton i Triton su se formirali iza Neptunove orbite i postali najveći objekti u pojusu. Ovakav pristup jedino odmah ne rešava kako je Triton uhvaćen u orbitu Neptuna kao njegov satelit. Postoje neke hipoteze koje predlažu recimo sudar sa prvobitnim Neptunovim satelitom. Ipak, tek bolje razumevanje populacije i dinamike Kajperovog pojasa će nam ukazati na dinamičku istoriju Tritona.

Komete i Kentauri

Jupiterova familija kometa (komete čiji afeli presecaju ili se približavaju Jupiterovoj orbiti tako da on na njih snažno utiče) su najmanji objekti u spoljnom Sunčevom sistemu i veruje se da potiču iz Kajperovog pojasa. Jezgra tih kometa imaju ograničeno vreme u kojem na njima aktivno sublimira materijal na $\sim 10^4$ godina i vreme dinamički stabilnih orbita na $\sim 10^5$ godina

(usled izbacivanja ili udara sa planetama ili Suncem). Da bi se održavala stabilna populacija kometa na velikim vremenskim skalamama potrebno je da postoji i stabilan izvor koji popunjava tu populaciju. Pre se mislilo da komete Jupiterove familije potiču od dugoperiodičnih kometa (iz Ortovog oblaka) gravitacionim zarobljavanjem od strane velikih planeta kad komete uđu u planetarni deo Sunčevog sistema, ali detaljni proračuni govore da je taj put nastanka kometa Jupiterove familije neefikasan. Najverovatnije da su te komete nekadašnji objekti u Kajperovom pojasa koji su privučeni ka unutrašnjosti Sunčevog sistema uticajem planeta. Nestabilnost Kajperovog pojasa, koja izaziva pomeranje objekata sa orbita koje su iza Neptuna na orbite bliže Suncu, može biti ili dinamički haos ili sudari. Kad neki objekat preseca Neptunovu putanju, za prelaz u unutrašnji planetarni region mu je potrebno od 10^7 do 10^8 godina.

Ako komete Jupiterove familije potiču iz Kajperovog pojasa i na kraju imaju orbite ne mnogo veće od Jupiterove, očekivalo bi se da možemo videti objekte u tranziciji, tj. objekte koji se trenutno pomeraju od Kajperovog pojasa ka unutrašnjosti. Ovi objekti su verovatno poznati i pripadaju klasi Kentaura. Trenutno je poznato oko 30 Kentaura i neki od njih pokazuju kometsku aktivnost. Najbolje proučeni Kentaur (2060) Hiron ima leda na površini i pokazuje stalnu komu već oko petnaest godina. Drugi (recimo 5145 Fолос) nemaju komu što dozvoljava da se jezgro direktno proučava. Kao i objekti u Kajperovom pojusu i Kentauri pokazuju veliku raznolikost u bojama.

Proučavanje

Trenutno najveći problem u proučavanju Kajperovog pojasa je nedostatak dovoljno moćnih instrumenata za otkrivanje i analizu objekata veličine od nekoliko stotina kilometara na udaljenosti od preko 5 milijardi kilometara.

Svemirski infracrveni teleskop Spitzer omogućuje detekciju termalnog zračenja za stotinak najsjajnijih objekata, odakle se može više sazнати о albedu, boji i rotacionim karakteristikama objekata, a s tim podacima i o efektima sudara, bombardovanju kosmičkim zracima, razlikama u strukturi itd.

Misija GAIA (čije se lansiranje očekuje u drugoj polovini 2011. godine) će omogućiti astrometrijsko i fotometrijsko posmatranje celog neba i trodimenzionalnu mapu Mlečnog puta i Sunčevog sistema do magnitudo $m = 20$, što će pružiti i potpunu sliku sjajnijih objekata u Kajperovom pojusu oslobođenu svih nedostataka selektivnog posmatranja sa Zemlje i dati pravu raspodelu Kajperovog pojasa.

Za bližu budućnost planira se i Large Synoptic Survey Telescope (početak rada i probna snimanja se očekuju 2015. godine) čija će granična magnituda biti $m = 24$ i pretraživaće nebo na svakih oko nedelju dana što bi moglo da omogući praćenje astrometrijskih i fotometrijskih podataka za ~ 10000 objekata u pojusu. Znanje o dinamičkoj strukturi i sadržaju pojasa bi se povećalo višestruko da bi se moglo uporediti sa trenutnim podacima za glavni asteroidni pojaz.

Zagonetke

Kajperov pojaz je ukazao na veliki broj stvari u vezi sa stvaranjem našeg planetarnog sistema, ali je otvorio i mnogo novih nedoumica koje trebaju da se odgovore. Dve različite populacije i oštra granica u klasičnom pojusu, način na koji je izbačeno preko 99% mase pojasa od njegovog nastanka, orbite objekata proširenog rasejanog diska. Sve su to zagonetne karakteristike Kajperovog pojasa na koja nemamo odgovor. Postoje nekoliko hipoteza kao

rešenja nekih od ovih karakteristika. Mehanizmi koji bi mogli da reše više zagonetki odjednom su: postojanje objekata približne veličine Zemlje u ranom Kajperovom pojasu koji se kasnije izbace iz planetarnog sistema i bliski prolazak zvezde pored Sunca dok se ono još nalazi u zvezdanom jatu gde je nastalo. U prvom modelu objekti veličine Zemlji bi ustvari bili propale planete koje bi menjale orbite objekata u Kajperovom pojasu, a koje bi kasnije bili izbačeni iz sistema pod uticajem velikih planeta. Dok u drugom modelu blizak prolazak zvezde se dogodio dok se planete još nisu formirale, a imao je perihel na svega nekoliko stotina AJ (100 – 500 AJ). Ovakav scenario se detaljno obrađuje i u ovom radu, sa posebnim osvrtom na formiranje Ortovog oblaka.

Ortov oblak

Sunčeva gravitacija je dominantna nekih 3000 puta dalje od udaljenosti poslednjih planeta od Sunca. Egzosfera Sunčevog sistema se prostire do gotovo pola puta do najbližih zvezda. U tom prostoru se nalazi Ortov oblak koji je prostorno najveći deo celog Sunčevog sistema. U njemu dominiraju komete, tj. ostaci materijala od formiranja planeta. Temperatura u Ortovom oblaku je izuzetno niska, svega četiri stepena iznad apsolutne nule, a susedni objekti su udaljeni jedni od drugih prosečno nekoliko desetina miliona kilometara. Sunce, i dalje najsjajnija zvezda na nebu, je sjajno samo kao Venera na Zemljinom nebu.

U četvrtom veku pre nove ere, Aristotel je smatrao da su komete oblaci svetlećeg gasa u visokim slojevima Zemljine atmosfere. Seneka je u prvom veku prvi sugerisao da su komete nebeska tela koja putuju duž svojih putanja po nebeskom svodu. Petnaest vekova kasnije ova hipotezu je potvrdio danski astronom Tiho Brahe poredeći posmatranja komete iz 1577. godine iz nekoliko mesta u Evropi. Ako je kometa relativno blizu, onda bi iz svakog mesta iz kojeg se posmatra, kometa imala drugačiji položaj na nebu u odnosu na zvezde. Brahe nije mogao da detektuje nikakve razlike u položaju tako da je zaključio da se kometa nalazila negde iza Mesečeve orbite.

Tačne udaljenosti kometa su postale poznate tek izračunavanjem njihovih orbita. Prvi katalog kometa sačinio je engleski astronom Edmond Halej 1705. godine u kojem se nalazilo 24 objekata. Zbog veoma nepreciznih posmatranja Halej nije mogao da dobije ništa drugo od grubih parabola za orbite komete. Ipak, shvatio je da su putanje verovatno veoma izdužene elipse koje obilaze oko Sunca. Edmond Halej je shvatao da komete prelaze ogromne udaljenosti i čak da se možda nalaze i u prostoru između zvezda. Ova prva prosta ideja o oblaku kometa između zvezda je pomogla zaključivanju o postojanju Ortovog oblaka dva veka kasnije, jer se od početka krenulo ispravnim koracima. Halej je još primetio da komete iz 1531., 1607. i 1682. godine imaju veoma slične orbite i da su njihove pojave vremenski odvojene približno 76 godine. Odатле je zaključio da se radi o istoj kometi i predvideo njenu sledeću pojavu 1758. godine koju nažalost nije dočekao da vidi. Umro je 1742. godine, pre kometine pojave koja u njegovu čast nosi ime Halejeva kometa i koja se poslednji put našla među unutrašnjim planetama 1986. godine.

Podela

Komete se dele u dve grupe prema vremenu potrebnom da kometa pređe celu orbitu oko Sunca (što je direktno povezano sa srednjim rastojanjem od Sunca). Dugo-periodične komete, kao recimo Hjakutake (Hyakutake) ili Hejl-Bop (Hale-Bopp), imaju orbitalne periode duže od 200 godina. Nasuprot njima, kratko-periodične komete, imaju periode orbita kraće od 200 godina. U prošloj deceniji astronomi su kratko-periodične komete podeli u dve podgrupe: komete Jupiteove familije, kao recimo Enkeova kometa (Encke) ili Tempel 2, koje imaju periode kraće od 20 godina, i komete Halejevog tipa, ili srednje-periodične komete, sa periodima od 20 do 200 godina.

Ovakvo definisanje je pomalo proizvoljno, ali ogleda i neke stvarne razlike među ovim kometama. Granica između dugo- i kratko-periodičnih kometa odgovara velikoj poluosni od $200^{2/3} = 34.2$ AJ (astronomskih jedinica). Ovakva podela odgovara jer: (i) razlikuje komete na one čiji afeli leže u blizini planetarnog regiona i one čiji afeli leže dalje; (ii) orbitalni period od 200 godina odgovara približno periodu stalnog posmatranja teleskopima, broj poznatih kometa sa dužim periodima je dosta nepotpun; (iii) planetske perturbacije putanja kometa sa dužim periodima od 200 godina nisu povezane u narednim kometinim dolascima. Srednje- i dugo-periodične ulaze u planetarni deo Sunčevog sistema iz svih smerova po približno uniformnoj raspodeli. Dok kratko-periodične komete Jupiterove familije se kreću po putanjama koje najčešće nemaju veću inklinaciju od 40° , tj. nisu nagnute više od 40° u odnosu na ekliptiku. Srednje- i dugo-periodične komete dolaze iz Ortovog oblaka, dok komete Jupiterove familije potiču iz Kajperovog pojasa. Moguće je i da Jupiter promeni putanju dugo-periodične komete tako da ona postane kratko-periodična, ali samo $\sim 10\%$ kratko-periodičnih kometa Jupiterove familije su komete iz Ortovog oblaka.

Dugo-periodične komete

Kad je početkom dvadesetog veka u katalogu kometa bilo dovoljno dugo-periodičnih kometa, mogla je da se uradi prva statistička raspodela. Ispostavilo se da kad se izračunaju putanje preko podataka koje se dobiju kada su komete blizu perihela, tj. samo preko malog dela orbite dobije se da trećina kometa ima izgleda sa potiče iz međuzvezdanog prostora što nije moglo biti tačno. Takve komete bi imale mnogo veće brzine nego što imaju komete koje vidamo na nebu. Da bi se rešio problem, astronomi su izračunavali putanje kometa unazad u vreme i dobili kao rezultat da planetni uticaji na komete su poprilični i da im oni menjaju značajno orbite i da skoro sve komete imaju eliptične putanje i pre prolazaka pored planeta. Odatle se zaključilo da komete ipak pripadaju Sunčevom sistemu, i da planete imaju veoma jak uticaj na putanje kometa.

Statistički se uvidelo i da su oko dve trećine dugo-periodičnih kometa uniformno raspoređene, a da jedna trećina tela ima takve orbitalne energije koje ulaze u uzak interval. Taj interval predstavlja orbite koje se pružaju do veoma velikih udaljenosti – 20000 hiljada AJ i dalje. Takve putanje imaju periode preko milion godina. Kasnih 1940-tih godina holandski astronom Adrian van Verkom (Adrianus Van Wörkom) je pokazao da uniformna raspodela onih dve trećine kometa može da se objasni preko planetarnih perturbacija koje izbacuju komete na manje i veće orbite na sasvim slučajan način. Pa pitanje je bilo odakle onda potiču dugo-periodične komete? Holandski astronom Jan Hendrik Ort (Jan Hendrik Oort) je ukazao na to da pik kometa sa periodima preko milion godina mora da pokazuje na originalni izvor dugo-periodičnih kometa. Izvor je ogromni sferoidni oblak tela koji okružuje planetarni sistem i proteže se do polovine puta do najbližih zvezda.

Ortov podvig pravilno tumačeći orbitalnu raspodelu dugo-periodičnih kometa je još više impresivan kad se zna da je imao na raspolaganju samo 19 kometa sa precizno određenim putanjama. Danas astronomi poznaju 15 puta više putanja kometa. I danas je poznato da dugo-periodične komete ulaze u planetarni region po prvi put sa prosečne udaljenosti od 44000 AJ. I takve orbite imaju period od 3.3 miliona godina. Ipak postoji ogroman broj kometa na manjim udaljenostima, ali su njihove orbite stabilnije, tako da do planetarnog sistema dođu samo najudaljenije komete, tj. one koje je lako perturbovati sa svoje prvobitne putanje.

Uticaji na oblak

Komete su veoma slabo gravitaciono vezane za Sunce, tako da zvezde koje prolaze blizu našeg sistema stalno im menjaju orbite. Na rastojanju manjem od jednog parseka svakih milion godina prođe 12-14 zvezda. Ti bliski susreti iskomešaju komete u oblaku, promene im inklinacije i pošalju ih u unutrašnji Sunčev sistem sa veoma izduženim eliptičnim putanjama. Kako ulaze u planetarni sistem po prvi put, kometine putanje se menjaju pod uticajem planeta, dobijaju ili gube orbitalnu energiju. Neke se izbace iz Sunčevog sistema. Ostale se vraćaju i opet ih posmatramo kao članove one uniformne raspodele. A neke ostanu u planetarnom delu sistema kao komete Halejevog tipa. Svega ~5% novih dugo-periodičnih kometa posle prolaska kroz planetarni region ima i dalje takve putanje koje će ih vratiti u spoljni deo Ortovog oblaka odakle su došle.

Stelarne perturbacije nisu uvek blage. Povremeno zvezda dođe toliko blizu Sunca da prođe pravo kroz Ortov oblak, silovito menjajući putanje kometa duž svoje putanje. Statistički se očekuje da zvezda prođe na manje od 10.000 AJ od Sunca svakih 36 miliona godina; a unutar 3.000 AJ na svakih 400 miliona godina. Komete blizu putanje zvezda se izbace u međuzvezdani prostor, dok putanje ostalih kometa se veoma promene tokom prolaska zvezde.

Iako bliski zvezdani prolasci nemaju direktni uticaj na planete, mogu da imaju snažne indirektne efekte. Statistički, najbliži zvezdani prolazak tokom istorije Sunčevog sistema je bio na oko 800 AJ, rastojanju uporedivom sa najvećim udaljenostima objekata u Kajperovom pojasu, tj. na manjem rastojanju od Ortovog oblaka. Takav bliski prolazak bi izazivao pravi stampedo kometa koje krenu ka planetama, povećavajući broj kometa koji uđe u planetarni region i nekoliko stotina puta. A time i povećavajući broj udara kometa o planete i prouzrokujući moguće izumiranje na Zemlji.

Na samom kraju prošlog veka pronađen je dokaz za takav "roj" kometa. Koristeći redak izotop helijuma, helijum 3, kao indikator količine materijala iz svemira na Zemlji, dobijena je količina međuplanetarne prašine u sedimentima u okeanima tokom vremena. Nagomilavanje te prašine treba da odražava broj prolazaka kometa kroz planetarni region, jer svaka kometa ostavlja prašinu za sobom. Otkriveno je da se količina helijuma 3 povećava naglo na kraju Eocena, pre oko 36 miliona godina i da se smanjuje polako narednih dva do tri miliona godina; tačno onako kao predviđa ideja o roju kometa. Kasni Eocen je poznat kao doba masovnog izumiranja vrsta na Zemlji srednjeg inteziteta. Poznato je i nekoliko kratera iz tog perioda. Postoje i drugi tragovi udara objekata u sedimentima na Zemlji, kao što je sloj iridijuma i mikrotektiti.



Planeta Zemlja trenutno nije u opasnosti od kometskog roja. Koristeći zvezdani katalog koji je načinio satelit Hiparh (Hipparcos) rekonstruisane su putanje zvezda u blizini Sunčevog sistema. U poslednjih milion godina nije prošla nijedna zvezda veoma blizu Sunca. Sledeći bliski prolaz desiće se za 1.4 miliona godina kada će mala zvezda, crveni patuljak, Gliese 710, proći tačno kroz spoljni Ortov oblak na oko 70.000 AJ od Sunca. Ipak zbog svoje male mase, procenjuje se da će Gliese 710 povećati broj kometa u unutrašnjem Sunčevom sistemu za oko 25%, tako da nema opasnosti od kometskog roja.

Pored bliskih zvezdanih prolazaka, na Ortov oblak utiču još dva faktora. Prvo, oblak je dovoljno velik i dovoljno udaljen od Sunca da su veoma osetne plimske sile koje prouzrokuje disk Mlečnog puta i u manjem obimu jezgro Galaksije. Ove sile nastaju usled različitog rastojanja Sunca i komete od ravni diska, odnosno jezgra Galaksije, pa prema tome osećaju različitu gravitacionu silu. Ove sile pomažu da nove dugo-periodične komete krenu ka planetarnom regionu.

Drugi faktor su prolasci pored ili čak kroz ogromne molekularne oblake. Masivni oblaci vodonika, mesta gde se rađaju zvezde, imaju od sto hiljada do milion masa Sunca. Kad se Sunčev sistem približi oblaku, ogromna gravitaciona sila menja putanje kometa koje ili krenu ka Suncu ili vrlo često se izbace u međuzvezdani prostor. Ovakvi prolasci, iako izuzetno snažni su i izuzetno retki – dese samo jedanput u 300 - 500 miliona godina.

Intenzitet uticaja Galaksije je za oko 1.5-2 puta veći od uticaja zvezda. Ipak, prilikom bliskih prolazaka zvezda, taj uticaj nadjača uticaj Galaksije i do 20 puta. A opet, proračuni govore da prolasci pored molekularnih oblake, koji su se desili do sada, imaju zajedno isti kumulativni efekat kao i svi prolasci zvezda pored Sunca.

Karakteristike oblaka

Jedine podatke o karakteristikama nam daju dugo-periodične komete. Relativno mali uzorak i činjenica da distribucija orbitalnih elemenata nije jako povezana sa svojstvima Ortovog oblaka otežava shvatanje karakteristika najdaljih krajeva Sunčevog sistema. Jedan od najvećih problema je komparacija predviđene i posmatrane distribucije orbitalnih elemenata.

Veliko pitanje o Ortovom oblaku je njegova sama struktura.. Da bi se saznalo nešto o strukturi potrebno je znati kako zvezdane, galaktičke perturbacije menjaju putanje kometa u oblaku. Da bi se uvideli ti uticaji vrše se numeričke simulacije. Komete na samom spoljnem kraju se brzo gube iz oblaka, ili se izbace u međuzvezdani prostor ili krenu ka unutrašnjosti Sunčevog sistema, i to sve zbog gravitacionih perturbacija. Ali dublje u oblaku najverovatnije se nalazi dosta gušće unutrašnje jezgro Ortovog oblaka u kojem se nalaze komete koje su jače gravitaciono vezane za Sunce. Na njih može da deluju samo jači perturberi (zvezdani prolasci, ili molekularni oblaci) i ti objekti dobijaju energiju tako da im se povećava udaljenost od Sunca. Tada konstantno popunjavaju spoljašnji Ortov oblak i sprečavaju veće rasipanje tog dela oblaka, jer pri jačim perturbacijama se izgubi dosta kometa. Naravno, vremenom se smanjuje broj kometa u unutrašnjem delu oblaka, ali on je i dalje velik. To je naseljeniji deo oblaka, sa 50-80% svih kometa u oblaku.

Kometama iz Ortovog oblaka, inklinacije se ne menjaju prilikom prilaska ka planetarnom regionu. To je jedan od razloga zašto astronomi smatraju da kratko-periodične komete Jupiterove familije koje imaju malu inklinaciju potiču iz Kajperovog pojasa, a ne iz Ortovog oblaka. Ortov oblak je najverovatnije izvor kometa Halejevog tipa koje imaju veće inklinacije i koje su nekad bile dugo-periodične komete, ali ih uticaj planeta prebacio na putanje sa kraćim periodima koje ne napuštaju planetarni region.

Smatra se da je Ortov oblak sadrži veoma veliki broj kometa. Broj kometa zavisi od stope kojom se komete izbacuju iz oblaka u međuzvezdani prostor. Preko broja dugo-periodičnih kometa koje dođu u planetarni region i koje mi posmatramo, procenjuje se da u oblaku ima dva do pet biliona kometa ($2\text{-}5 \times 10^{12}$ kometa). Ovaj podatak komete Ortovog oblaka čini najbrojnijim telima u Sunčevom sistemu. Od svih tih kometa samo jedna petina do jedne polovine njih se nalazi u spoljašnjem, aktivnom delu oblaku kojeg je prvi opisao Jan Ort. Ostale komete, koje mi ne vidamo, jer ne dolaze u planetarni region iz razloga što se nalaze bliže planetama i imaju stabilnije orbite, se nalaze u centralnom delu Ortovog oblaka. Procena je da u ceo oblak ima masu oko 15-40 masa Zemlje.

Formiranje i popunjavanje oblaka

Komete u oblaku nisu mogle nastati na svojim sadašnjim mestima, jer je materijal na tako ogromnim udaljenostima toliko proređen da se tu zaista ništa nije moglo spojiti u objekte od nekoliko kilometara. Komete nisu mogle nastati ni u međuzvezdanom prostoru, jer je hvatanje kometa u Sunčev sistem jako neefikasan proces. Jedino mesto koje je preostalo za nastanak kometa je planetarni region. Ort je predlagao da su sve komete možda nastale u asteroidnom pojasu i kasnije izbačene preko velikih planeta tokom formiranja Sunčevog sistema. Problem je što su komete tela puna leda, a asteroidni pojas je previše topao za led.

U periodu kad su astronomi dolazili do ideje o Ortvom oblaku, nekoliko astronoma je došlo do ideje o asteroidnom pojasu iza Neptunove orbite, danas poznat kao Kajperov pojas. Kajper je takođe shvatio da komete u Ortvom oblaku se mogu vratiti do planetskog regiona perturbacijama koje bi proizvele zvezde koje prolaze blizu Sunca. Kajper je jedino precenio ulogu Plutona koji nema dovoljnu masu da objekte izbacuje u Ortv oblak.

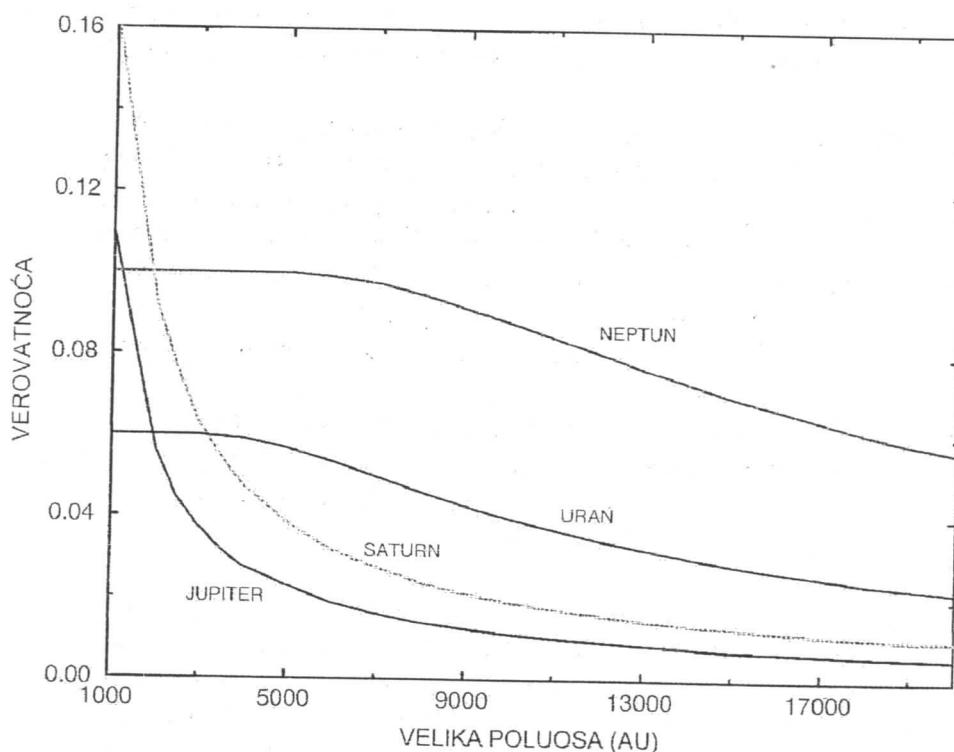
Popunjavanje

Komete verovatno potiču iz oblasti velikih planeta, ali astronomi su dugo prepostavljali da su perturbacije pod uticajem Neptuna i u manjoj meri Urana, glavni proces koji je menjao putanje objektima od približno kružnih koje su imali u planetarnom regionu, do veoma izduženih, skoro paraboličnih koje dobiju posle susreta sa planetom. Razlog za ovakav zaključak je činjenica da je tipična promena orbitalne energije tela posle gravitacionog uticaja Neptuna ($\sim 2 \times 10^{-5} \text{ AJ}^{-1}$) nešto manja od orbitalne energije tela u Ortvom oblaku ($\sim 3\text{-}6 \times 10^{-5} \text{ AJ}^{-1}$). Stoga, pri bliskom susretu nekog tela sa Neptunom, mnogo verovatnije je da će on upasti u raspon energije Ortvog oblaka, nego da će biti izbačen iz Sunčevog sistema. Sa druge strane, perturbacije pod uticajem Jupitera su mnogo jače ($\sim 1.5 \times 10^{-3} \text{ AJ}^{-1}$), stoga najverovatnije je da komete posle susreta sa najvećom planetom samo prolete kroz Ortv oblak hiperboličnom putanjom.

Planeta	verovatnoća
Jupiter	0.60
Saturn	0.24
Uran	0.06
Neptun	0.10

Tabela 1 – Verovatnoća da data planeta kontroliše dinamičku evoluciju objekta koje se nalazi u blizini Neptuna (preuzeto iz Fernandez 1997))

Kasnije dinamičke studije su bacile sumnju na ovakav scenario. Numeričke simulacije su pokazale da telo koje počinje svoju dimamičku evoluciju u okolini Neptuna (što je uglavnom i slučaj), najčešće završi tako što biva izbačeno pod uticajem Jupitera. Tačnije, oko 60% se nađe pod uticajem Jupitera, a od toga više od polovine tela završe kao vidljive komete Jupiterove familije. Verovatnica je 15-20% da telo ostane pod gravitacionim kontrolom Neptuna. Naravno, to su vrednosti za sadašnji Sunčev sistem. Ako se u račun ubaci i prvobitni uslovi gde su jedino bili formirani Jupiter i Saturn, a gde su tek kasnije nastali Uran i Neptun, onda je ukupni uticaj dve poslednje velike planete još manji. Verovatnoća da telo, kojem je prvobitna približno kružna putanja sa malom inklinacijom na udaljenosti malo većoj od Neptunove, završi pod gravitacionom kontrolom određene velike planete je data u Tabeli 1.



Slika 4 - Verovatnoća za svaku planetu da objekat, koji je na početku svoje dinamičke evolucije nešto izvan planetarnog regiona u blizini Neptuna, izbaci u Ortovog oblak na odgovarajuće rastojanje (preuzeto iz Fernandez 1997).

Ipak, različita je verovatnoća, od planete do planete, da će telo biti i izbačeno do Ortovog oblaka. Ako uzmemu u obzir klasični Ortov oblak iz kojeg se tela vraćaju u planetarni region kao dugo-periodične komete ($a > 15000$ AJ), Neptun ipak, prenesti najveći broj kometa. Iako se čak 60% tela nađu pod uticajem Jupitera, veoma je mala verovatnoća da će se ti objekti zaista i

naći u Ortovom oblaku (verovatnoća je manja od 2%). Međutim, situacija se menja ako posmatramo unutrašnje delove Ortovog oblaka. Na primer, na udaljenost od $a \sim 4000$ AJ Saturn, i nešto manjoj meri Jupiter premeste značajan broj kometa (oko 30%) Za graničnu oblast između Ortovog oblaka i Kajperovog pojasa ($a \sim 1000$ AJ) Saturn i na drugom mestu Jupiter imaju najveći deo u izbacivanju objekata. Na slici 4. vidimo verovatnoću premeštanja objekata u oblak za svaku planetu u zavisnosti od rastojanja u oblaku. Popunjavanje Ortovog oblaka je kompleksni kosmički bilijar među velikim planetama, u kojem sve one imaju značajnu ulogu u procesu.

Komete mogu da se izbace u oblak sa različitim rastojanjima u Sunčevom sistemu i stoga iz oblasti sa različitim temperaturama prilikom formiranja. Ovo može da objasni razlike u sastavu kod posmatranih kometa. Oblak može da ima čak i asteroide iz regiona unutrašnjih planeta. Ti objekti, koji su naravno stenoviti, a ne od leda kao ostala tela u oblaku, mogu da doprinesu samo 2 do 3 procenta od celokupnog broja kometa u oblaku.

Formiranje

Ortov oblak je nastao u periodu neposredno posle formiranja velikih planeta. Velike planete su izbacivale objekte iz planetarnog regiona. Prvo su bili formirani Jupiter i Saturn koji su u prvi mah sami izbacivali tela, a tek kasnije su se formirali Uran i Neptun. Bilo je potrebno da se objekat izbaci na izduženu putanju, a kasnije je najviše uticaj Galaksije povećavao perihel objektu tako da se on udaljavao od planetarnog regiona. Mada je i molekularni oblak, odnosno zvezdano jato u kojem je Sunce nastalo imalo velik uticaj na formiranje oblaka. Molekularni oblak je mogao da izvuče tela u Ortov oblak sa putanja koje su bile veoma blizu planetarnom regionu, na oko 1000 - 2000 AJ. Naseljavanje Ortovog oblaka se inteziviralo kad su planete počele da migriraju nekih 600 miliona godina posle formiranja Sunca i kad se velikom broju objekata promenio položaj. Nekoliko desetina miliona godina posle migracije stopa naseljavanja Ortovog oblaka počela je značajno da opada. Sve do danas. Generalno, efikasnost formiranja Ortovog oblaka je mala, svega 2.5% masе prvobitnog protoplanetarnog diska oko Sunca od kojeg su nastali svi objekti se našlo u Ortovom oblaku za ovih 4.5 milijardi godina.

Uran i Neptun su objekte izbacivali i u rasejani pojas Kajperovog pojasa. Odatle posle određenog vremena objekti mogu da se presele u prošireni rasejani disk gde na njih planete više nemaju jak uticaj, jer im je perihel izvan planetarnog regiona, a vremenom se najčešće presele u Ortov oblak. Trenutno jedini izvor novih kometa za oblak jeste rasejani disk Kajperovog pojasa. Dinamički proračuni govore da se danas oko 5 objekata prečnika većeg od 1 km godišnje prebacuju iz rasejanog diska ka Ortovom oblaku (Fernandez et al). Ipak, mnogo se više kometa izbacuju iz oblaka nego što dođe iz unutrašnjosti Sunčevog sistema. Stopa dolaska novih kometa je oko 10 puta manja od stope izbacivanja kometa iz oblaka (Fernandez et al). Ali i pored toga u oblaku, u kojem i sada ima izuzetno puno tela, usled stalnog dolaska novih objekata efekat obnove populacije nije nimalo zanemarljiv. Na udaljenostima $a > 25000$ AJ svega 20% kometa preživi 4.5×10^9 godina, vremenski period koliko je star Sunčev sistem.

Znamo da i druge zvezde imaju velike planete, pa verovatno imaju i oblake kometa analogne Ortovom oblaku. Iz takvih oblaka kometa se polako izbacuju u međuzvezdani prostor. Međuzvezdana kometa kad bi se približila planetarnom regionu lako bi se prepoznaла zbog mnogo veće brzine koje ima u odnosu na komete iz našeg oblaka. Ipak do danas nije detektovana nijedna takva kometa. Ovo nije toliko začuđujuće, jer je Sunčev sistem izuzetno mali u odnosu

na prostranstva međuzvezdanog prostora, a mi posmatramo komete veoma kratak period. Procenjuje se da je u najboljem slučaju verovatnoća 50% da je neka međuzvezdana kometa proletela pored nas u ovih nekoliko stotina godina.

Komete se nisu puno promenile od vremena kad su nastale, pa nam mogu dati veoma značajne podatke o poreklu Sunčevog sistema. Iz tog razloga šalju se letelice koje proučavaju komete. Stardust letelica je 2004. godine je proletela kroz komu komete Vild 2. 2006. godine nam je vratila kometsku prašinu koju je pokupila prilikom prilaza kometi. Deep Impact misija je jula 2005. godine na jezgro komete Tempel 1 bacila kuglu mase 370 kilograma i napravila krater veličine preko 50 metara. Misija je pokazala da komete imaju mnogo više prašine i manje leda nego što se očekivalo. Rozeta (Rosetta) letelica je lansirana 2004. godine i 2014. godine se očekuje da uđe u orbitu oko komete Čurumov-Gerasimenko (Churyumov-Gerasimenko). Planira se misija čija će se letelica sledeće decenije spustiti na kometu, uzeti uzorke i vratiti ih na Zemlju.

Zvezdani prolasci

Zvezde najčešće nastaju u razvejanim zvezdanim jatima unutar molekularnih oblaka. Posmatranja ukazuju na to da tipično mlado razvejano zvezzano jato ima prečnik oko 1 parseka ($\sim 3 \times 10^{13}$ km) i da se sastoji od nekoliko stotina članova. Posle nekoliko stotina miliona godina svako razvejano jato se dezintegriše (zvezde prestaju da budu gravitaciono vezane u grupi) uzrokovano gravitacionim uticajima molekularnih oblaka, strukture diska Mlečnog puta i interakcijama između samih zvezda, tako da veliki deo zvezda medusobno pertubuju, tj. približavaju se na mala rastojanja. Nedavna proučavanja govore da veliki broj zvezda nastaje u ekscentričnim binarnim sistemima koji su dovoljno dugo vezani da se desi više bliskih prolazaka između njih. Čak i posle razdvajanja sistema ili u slučaju ako je zvezda nastala nevezana u sistemu, zvezdani prolasci će se desiti pre raspada samog jata. Procenjuje se da je vremenska skala na kojoj se dve zvezde približe na rastojanje ~ 200 a.j. uporediva sa vremenskom skalom dezintegracije zvezdanog jata (Laughlin i Adams, 1998), tako da zvezdani prolasci u velikoj meri utiču na evoluciju protoplanetarnih diskova. Larwood i Kalas (2001) su ukazali da asimetrija i prstenasta struktura protoplanetarnog diska oko zvezde Beta Pictoris je prouzrokovana bliskim zvezdanim prolaskom što je potvrđeno numeričkim simulacijama kojima je pokazano da ovakve strukture nastaju u spoljnjim delovima diska koji je snažno pertubovan. Na osnovu posmatranja odbačenog materijala obližnjih supernovih i udela te materije u protoplanetarnom disku veruje se da je prvobitno Sunčeve jato sadržalo ~ 2000 zvezda (Adams i Laughlin, 2001). Pa prema tome, kao član grupe zvezda popriličnih razmera Sunce je najverovatnije doživelo više bližih prolazaka pre nego što je izašlo iz samog jata. Takav rani zvezdani prolazak koji utiče na planetezimale, ima najviše efekta na unutrašnji deo Sunčevog sistema. Dok kasniji zvezdani polasci u galaktičkom okruženju ipak deluju značajnije na spoljašnji Sunčev sistem, jer se planetarni sistem već u potpunosti formirao.

U galaktičkom okruženju slično sadašnjem, rastojanja među zvezdama su toliko velika da mogu da utiču samo na najslabije vezane komete na ivici Ortovog oblaka. Slobodna kretanja Sunca i drugih zvezda u Galaksiji dovode do 12-14 prolazaka za milion godina na rastojanjima manjim od jednog parseka (Weissman 1998a). Tom stopom najbliži prolazak tokom istorije Sunčevog sistema statistički je bio reda veličine na 800-900 AJ. Takav prolazak ima značajan uticaj na spoljašnji Sunčev sistem, jer se promeni veliki broj orbita koje odjednom krenu ka

planetarnom delu sistema, i time praveći ono što nazivamo kometski pljuskovi, što je već spominjano. Neki krateri na Zemlji nastali su udarom stranog tela, masovna izumiranja i geochemijska israživanja nam govore da su se takvi pljuskovi pojavljivali. Određivanje frekvencije bliskih prolaska pored Sunca govori kakav su uticaj na naš sistem imali zvezdani prolasci kroz celu istoriju Sunčevog sistema, i kakav je tačan dinamički efekat na orbite kometskih objekata u spoljašnjem delu sistema. Dinamički modeli govore da jedan takav kometski pljusak traje oko 2-3 miliona godina (Weissman, 1998b) i da se u blizini planeta može naći i 300 puta više kometa u odnosu na prosečan broj pre prolaska zvezde.

Postoje pokušaji kataloške potrage za zvezdanim prolascima. Mülläri i Orlov (1996) su koristili teleskopska posmatranja da bi predviđeli zvezdane proliske pored Sunca od zvezda koje se nalaze u PVTCNS katalogu obližnjih zvezda. Ipak, korišćenje teleskopa na Zemlji ne daje dovoljno precizne podatke za paralaksu zvezda što ozbiljno otežava potragu za prolascima.

Poreklo vode na Zemlji

Masa okeana na Zemlji, odnosno što odgovara masi sve vode na planeti, je samo mali deo (~0.02%) ukupne mase planete. Ipak, postojanje okeana je dovoljno da da najupečatljiviji opis našoj planeti i na taj način je odvaja od ostalih planeta Sunčevog sistema. Čak, postojanje dovoljne količine vode u tečnom stanju je ključno za nastanak i evoluciju života.

Postoje dva osnovna pitanja oko porekla vode na Zemlji. To su: 'Kada su okeani formirani?' i 'Odakle se pojavila tolika količina vode?'. Kao odgovor na prvo pitanje postoje geološki dokazi koji nam govore o starosti okeana na planeti. 'Isua supracrusal' stene nađene na zapadnom delu Grenlanda (Rubinijum-Stroncijum datiranje na 3.8 milijardi godina) poseduju metasedimente i metavulkanske segmente (Appel et al 1998). Postojanje ovih sedimenata ukazuje da je postojala značajna količina vode (tj. okean) na Zemlji u vreme formiranja ovih stena. S druge strane, drugo pitanje je mnogo teže za rešiti.

Osnovna merna veličina kojom se pokušava otkriti više o poreklu vodi na Zemlji jeste D/H odnos, tj. koliko ima deuterijuma u vodi. Poznavanje koliko ima HDO molekula u odnosu H₂O molekula je krucijalni test za većinu teorija o mogućim izvorima okeana na Zemlji, jer se mora slagati sa trenutnom D/H u okeanima danas.

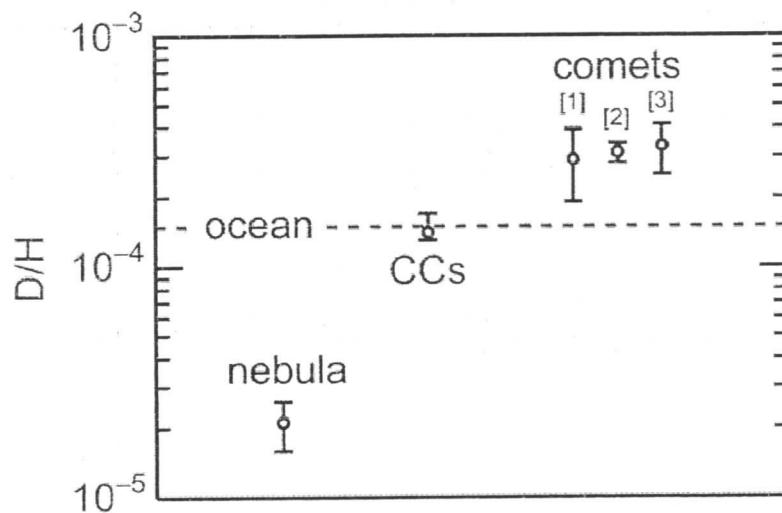
Prva Zemljina atmosfera je bila gusta (značajno gušća od sadašnje) i izuzetno bogata vodonikom i delimično vodom. Tokom vremena atmosferski vodonik reaguje sa oksidima kao što su FeO kojeg je bio dosta u okeanu magme na Zemlji i to je jedan od načina dobijanja veće količine vode (Ikoma & Genda 2006). Ali verovatno na taj način nije mogla da nastane potrebna količina vode. U početnom stadijumu D/H odnos je mogao da se menja, odnosno da se voda obogaćuje deuterijumom preko reakcije (Roberts 2000):



Dok je atmosfera imala dovoljno visoku temperaturu da sva voda bude u stanju pare, ova jednačina opisuje kako je stvaran D/H odnos. Kada je atmosfera ohladila, vodena para se kondenzovala i formirala okean. Posle toga ova jednačina gubi na značaju, jer je gotovo sav vodonik iz atmosfere potrošen (trenutno vodonika u atmosferi ima jako malo). Često se kaže da

ova početna količina vode ima poreklo iz Sunčeve magline, jer je D/H odnos te vode i gasa iz kojeg je nastala atmosfera, naravno ista. Atmosfera je nastala iz gasova planetezimala koji su akrecijom stvorili protoplanetu. Takođe znamo da D/H Sunčeve magline ne odgovara trenutnoj D/H vrednosti, a i jasno je da nije moglo nastati ovoliko vode koliko se sad nalazi u okeanima na gore opisan način. Tako da je potrebno naći druge izvore.

Mogući donosioci vode su ledeni planetezimali, tj. komete (prva ideja *Oro*, 1961) i stenoviti planetezimali koji takođe sadrže i vodu, recimo ugljenični hondriti – CC (Morbidelli et al 2000). Poznato je da je Zemljina atmosfera konstantno stalno dobijala nov materijal preko udara veoma velikih planetezimala o planetu, onih na samom repu raspodele po veličini. Prvi nagoveštaji o kometskom doprinosu okeanima dobijen je preko poređenja odnosa koncentracije plemenitih gasova argona, kriptona, kseona u atmosferi Zemlje, Marsa i Venere sa onima u meteoritskom materijalu i u kometskom ledu dobijenom u laboratoriji (Laufer et al 1999). U laboratorijskim istraživanjima nađeno je da se odnosi Ar/Kr/Xe u kometskom ledu i zemaljskom ledu razlikuju, što zajedno sa Ar/Kr/Xe odnosima u atmosferama unutrašnjih planeta ukazuje da je deo ovih gasova unesen na Zemlju i Mars kometama koje su se formirale na ~ 50 K, dok je ostatak došao izbjiganjem gasova iz unutrašnjosti. Koncentracija Ar/Kr/Xe u kometskom ledu zavisi od temperature formiranja leda. Količina CO zarobljenog u ledu opada eksponencijalno sa temperaturom formiranja. Ne ostaje zarobljen u ledu samo ispod 24 K, a H₂ ispod 20 K. Ovim istraživanjima je ukazano da je deo vode na Zemlju došao preko kometa, ali osnovno pitanje da li su komete osnovni izvor.



Slika 5 – HDO/H₂O odnos na kometama, ugljeničnim hondritima i solarnoj maglini u poređenju sa odnosom u okeanima na Zemlji (preuzeto iz Ikoma & Genda 2008)

Slika 5 pokazuje D/H vrednosti u različitim mogućim izvorima okeana na Zemlji (iz Ikoma & Genda 2008). Prosečna D/H vrednost u ugljeničnim hondritima je veoma slična onoj u današnjoj morskoj vodi. Ovi odnosi kod četiri komete kod kojih imamo ove podatke i kod vodonika u solarnoj maglini su veće za faktor 2, odnosno manje za faktor 7 od vrednosti u okeanima. Na osnovu ovih rezultata, morska voda se verovatno sastoji i od deo vode iz ugljeničnih hondrita. Ili jedna mogućnost je odgovarajuća mašavina vode iz kometa, iz solarne

magline i iz CC-a. Ipak, utisak je da komete koje bi trebale biti najvažniji izvor okeana, ipak imaju veće D/H odnose od pretpostavljenih.

Model simulacije i integrator

Pojedinačna zvezda, mase jednake jednoj Sunčevoj masi, prolazi pored Sunca na malom rastojanju krećući se hiperboličnom putanjom. Da bi se ispitao stvarni efekat ovakvog zvezdanog prolaska na prvoorbitni Kajperov pojas korisćena je numerička simulacija. Simuliran je gravitacioni sistem Sunce-zvezda u kojem se nalaze čestice bez mase koje pojedinačno predstavljaju planetezimale, odnosno Kajperov pojas u celini (a za drugu grupu simulacija (Tabela 3) i unutrašnju granicu Ortovog oblaka). Planetezimali su pod uticajem gravitacione sile Sunca (primarna zvezda) i zvezde koja prolazi (sekundarna zvezda) i nema međusobne interakcije. Na početku integracije 6000-10000 planetezimala su uniformno raspoređeni na udaljenosti 30-70 AJ od Sunca za prvi osam simulacija (Tabela 3), tj. 150-500 AJ za poslednje tri simulacije (Tabela 3). Takođe, svi planetezimali se nalaze u jednoj ravni (inklinacije su nula) i kreću se po kružnim putanjama (ekscentriciteti su nula). Početne longitude objekata u disku su dobijene generatorom slučajnih vrednosti.

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

$$\frac{d^2 \mathbf{r}_j}{dt^2} = -\frac{GM_1}{|\mathbf{r}_j|^3} \mathbf{r}_j + \frac{GM_2}{|\mathbf{R} - \mathbf{r}_j|^3} (\mathbf{R} - \mathbf{r}_j) - \frac{GM_2}{|\mathbf{R}|^3} \mathbf{R}, \quad (1)$$

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 planetezimale. Indirektna sila u zvezdanom susretu predstavlja uticaj sekundarne zvezde na Sunce, što se indirektno odražava i na kretanje planetezimala.

Za integraciju orbita planetezimala napravljen je *Runge-Kutta* (RK) integrator četvrtog reda sa promenljivom vrednošću koraka u integraciji (*adaptive step-size*). Ovaj integrator treba da reši u datom trenutku t diferencijalnu jednačinu (1), tj. sistem 2 diferencijalne jednačine prvog reda kojim zamenjujemo jednu dif. jednačinu drugog reda. Pored toga potrebno je integraliti jednačinu u tri prostorne ose što dovodi do ukupno 6 diferencijalnih jednačina koje moramo rešiti sa svaki planetezimal (i zvezde) u svakom koraku simulacije. Klasična Runge-Kuta metoda četvrtog reda traži rešenje (narednu vrednost) na sledeći način:

$$\begin{aligned} k_1 &= hf(x_n, y_n) \\ k_2 &= hf\left(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{k_1}{2}\right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 k_3 &= hf(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{k_2}{2}) \\
 k_4 &= hf(x_n + h, y_n + k_3) \\
 y_{n+1} &= y_n + \frac{k_1}{6} + \frac{k_2}{3} + \frac{k_3}{3} + \frac{k_4}{6} + O(h^5)
 \end{aligned} \tag{3}$$

Metoda Runge-Kuta četvrtog reda zahteva 4 međukoraka za svaki korak h .

Integratori koji koriste četvrti red RK imaju dovoljnu tačnost, a i veliku brzinu. Zbog toga se često koriste u problemima gde izuzetna preciznost nije krucijana stavka. Ako nam je potrebno da imamo veliku preciznost, efikasnije metode u tom slučaju su Bulirš-Štoer (*Bulirsch-Stoer*) ili prediktor-korektor (*predictor-corrector*) metode. Ipak RK metoda je brža, pa u slučaju kad imamo veliki broj nepoznatih ili je potrebno integraliti na veći period vremena RK metoda 4. reda je izuzetno kompetitivna. Pogotovo sa savremenom implementacijom kakva je Runge-Kuta metoda sa integrisanom promenljivom vrednošću koraka. Time se povećava efikasnost RK metode dvostruko. Brzina izvršavanja je značajno veća, a i preciznost omogućavajući više procesorskog vremena u određenim trenucima simulacije.

Implementiranje promenljive vrednosti koraka u integrator omogućuje da tokom simulacije možemo praviti česte promene brzine rada integratora u zavisnosti od onog što je potrebno u datom trenutku. Kroz „bogati“ teren potrebno je proći sa velikim brojem malih koraka, jer je nepoželjno slučajno loše analizirati važne trenutke puta. Isto tako kroz ravan, monoton period možemo praviti manji broj većih koraka neželeći zadržavati se previše vremena u manje važnom delu puta. Direktne dobiti u vremenu izvršavanja i efikasnosti primenom ove ideje, često se ne mere samo desetinama procenata ili faktorom 2, već vrlo često i faktorima deset, sto, pa čak i više puta.

Sama kontrola vrednosti koraka zahteva da algoritam za određivanje veličine koraka daje informaciju o kretanjima vrednosti koraka i da, što je najbitnije, određuje grešku koja se stvara različitim vrednostima koraka. Kao što je očigledno, izračunavanje ovih podataka će povećati komputaciono vreme, ali ovo ulaganje resursa (vremena izvršenja) se generalno povrati uz veliki dobitak u vremenu.

Postoji više načina pristupa problemu promenljivog koraka u simulaciji. Felberg (Fehlberg) je prvi došao do rešenja da koristi modifikovane RK jednačine koje se nazivaju „embedded“ Runge-Kuta jednačine. Felberg je otkrio metod petog reda koji dolazi do rešenja sa šest međukoraka (rešavaju se šest međujednačina), a različita kombinacija tih šest jednačina (različiti koeficijenti) daje metod četvrtog reda. (Da se podsetimo, obična metoda četvrtog reda koristi svega četiri međujednačine.). Razlika između rešenja za sledeći korak $y(x+h)$ između rešenja koja daje Felbergova metoda i metode RK4 se koristi da se izračuna kolika je greška (relativna) u rešenjima i time se da izračunati optimalna vrednost koraka koja treba da se koristi u narednom, ali ponekad i u istom koraku ako je odmah korišćena vrednost koraka neadekvatna (u našem slučaju ako je greška veća od dozvoljene), pa mora da se koriguje.

Opšti oblik jednačina Runge-Kuta metode petog reda je:

$$k_1 = hf(x_n, y_n)$$

$$\begin{aligned}
 k_2 &= hf(x_n + a_2 h, y_n + b_{21} k_1) \\
 k_3 &= hf(x_n + a_3 h, y_n + b_{31} k_1 + b_{32} k_2) \\
 k_4 &= hf(x_n + a_4 h, y_n + b_{41} k_1 + b_{42} k_2 + b_{43} k_3) \\
 k_5 &= hf(x_n + a_5 h, y_n + b_{51} k_1 + b_{52} k_2 + b_{53} k_3 + b_{54} k_4) \\
 k_6 &= hf(x_n + a_6 h, y_n + b_{61} k_1 + b_{62} k_2 + b_{63} k_3 + b_{64} k_4 + b_{65} k_5)
 \end{aligned} \tag{4}$$

$$y_{n+1} = y_n + c_1 k_1 + c_2 k_2 + c_3 k_3 + c_4 k_4 + c_5 k_5 + c_6 k_6 + O(h^6) \tag{4a}$$

A kombinacija istih jednačina koja daje metod četvrtog reda koju smo spominjali izgleda:

$$y_{n+1}^* = y_n + c_1^* k_1 + c_2^* k_2 + c_3^* k_3 + c_4^* k_4 + c_5^* k_5 + c_6^* k_6 + O(h^5) \tag{5}$$

Konstante koje se javljaju u jednačina moraju nam biti poznate da bili u mogućnosti da dobijemo rešenja. Postoje više poznatih setova rešenja za konstante. Originalne je dao još Felberg. Ovog puta korišćene su Keš-Karpove (*Cash-Karp*) konstante. One su date u sledećoj tabeli:

Keš-Karp-ovi parametri za „embedded“ Runge-Kuta metod						
i	a_i	b_{ij}			c_i	c_i^*
1	$\frac{1}{5}$				$\frac{37}{378}$	$\frac{2825}{27648}$
		$\frac{1}{5}$				0
		$\frac{3}{10}$	$\frac{3}{40}$	$\frac{9}{40}$	$\frac{250}{621}$	$\frac{18575}{48384}$
		$\frac{3}{5}$	$\frac{3}{10}$	$-\frac{9}{10}$	$\frac{125}{594}$	$\frac{13525}{55296}$
		$-\frac{11}{54}$	$\frac{5}{2}$	$-\frac{70}{27}$	$\frac{35}{27}$	0
		$\frac{1631}{55296}$	$\frac{175}{512}$	$\frac{575}{13824}$	$\frac{44275}{110592}$	$\frac{253}{4096}$
6	$\frac{7}{8}$				$\frac{512}{1771}$	$\frac{1}{4}$
$j =$		1	2	3	4	5

Tabela 2 – Keš-Karpovi koeficijenti za „embedded“ Runge-Kuta metod

Greška koju procenjujemo između jednačina 4a i 5 glasi

$$\Delta = y_{n+1} - y_{n+1}^* = \sum_{i=1}^6 (c_i - c_i^*) k_i \tag{6}$$

Ovom jednačinom znamo približno koliko grešku pravimo sa svakim korakom simulacije. Što je veći korak simulacije, imamo i veću grešku, ali veću brzinu izvršavanja. Zbog toga je potrebno znati kako grešku održavati na željenim vrednostima, vrednostima koje će dati dovoljno velik korak uz uslovno malu i prihvatljuvu grešku. Potrebno je poznavati na koji način Δ i h zavise jedno od drugog? Na osnovu jednačina 4 i 5 vidi se da se Δ odnosi kao h^5 . Tako da, ako uzmemo za veličinu koraka vrednost h_1 koja nam da grešku Δ_1 , tada korak vrednosti h_0 bi nam dao neku drugu grešku Δ_0 koju možemo proceniti kao

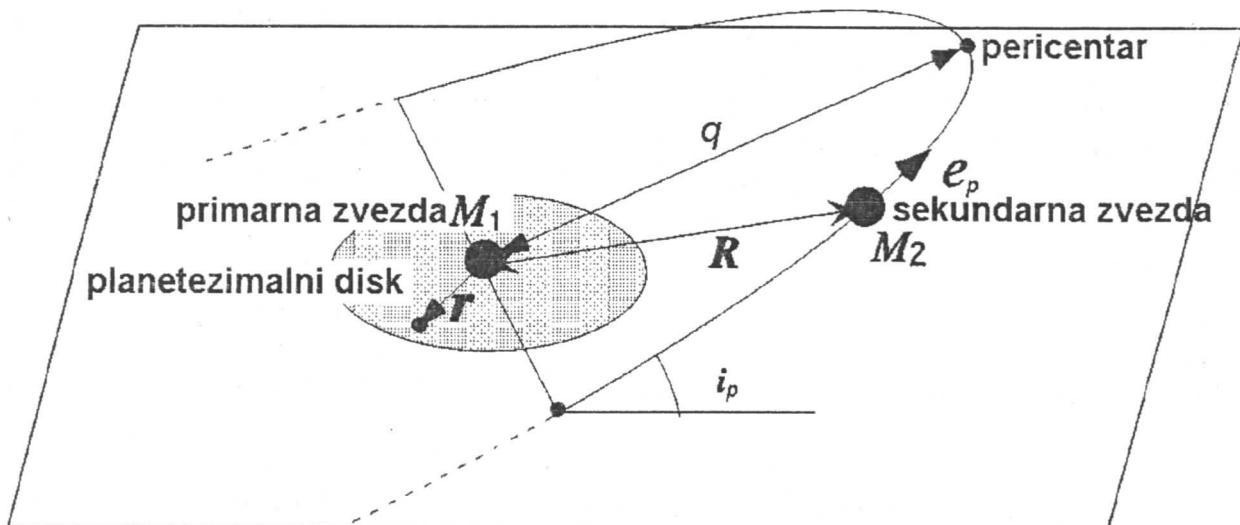
$$h_0 = h_1 \left| \frac{\Delta_0}{\Delta_1} \right|^{\frac{1}{5}} \quad (7)$$

U ovoj jednačini Δ_0 smatramo za željenu preciznost, tj. vrednost greške koju pojedinačan korak h_1 ne bi smeо da prekorači. Tako da jednačinu 7 koristimo da uporedimo veličine Δ_0 i Δ_1 . Ako Δ_1 ima veću vrednost od Δ_0 , tada nam jednačina govori koliko da smanjimo veličinu koraka kada ponovo prolazimo kroz trenutni (neuspeli) korak. U slučaju da je Δ_1 manji od Δ_0 jednačina ukazuje koliko možemo povećati veličinu koraka u narednom koraku.

Kada imamo sistem jednačina koje rešavamo, Δ_0 nam je ustvari vektor željene preciznosti za svaku diferencijalnu jednačinu u sistemu. Mi naručno, zahtevamo da naša preciznost bude u limitu dozvoljenih grešaka svih jednačina zajedno. Pa prema tome, veličinu koraka uvek računamo na osnovu jednačine (ili nepoznate) koja pravi najveću grešku u određenom koraku (u pravcu jedne koordinatne ose greška će biti veća nego u druge dve).

U našem sistemu, u svakom koraku računamo položaje i brzine svakog planetezimala ponaosob primenom i Felbergovih jednačina i običnih RK4 jednačina. Odlučili smo da posmatramo samo vektor položaja prilikom određivanja greške za izračunanje vrednosti koraka kada poređimo rešenja dvaju metoda koja koristimo (zanemaren je vektor brzine koji proporcionalno zavisi od vektora položaja). Vrednost greške za jednu komponentu vektora položaja u jednoj od osa koja se maksimalno dozvoljava je jedan kilometar (a time je greška vektora manja ili jednakoj toj vrednosti).

Sistem koji posmatramo simuliramo od trenutka kad je sekundarna zvezda na rastojanju na kojem je intenzitet gravitacione sile samo 2% intenziteta sile u pericentru (najблиže rastojanje zvezde od Sunca); krajnji položaj je kada sila na čestice iznosi 0.2% najjačeg uticaja, tj. kada se zvezda udalji na dovoljno veliko rastojanje da uticaj na položaj i brzine čestica postane neznatan. Sistem se posmatra duže nakon prolaska kroz pericentar iz razloga što je efekat prolaska zvezde na pojas tada izraženiji (Larwood & Kalas 2001).



Slika 6 – Prikaz bliskog zvezdanog prolaska pored primarne zvezde mase M_1 . Orbita zvezde mase M_2 koja prolazi pored planetezimalnog diska je definisana sa udaljenosti pericentra q , ekscentricitetom e_p , inklinacijom i_p , i brzinom u pericentru v_p .

Parametri prolaska zvezde pored protoplanetarnog sistema su: masa sekundarne zvezde (M_2), pericentar susreta (q), inklinacija orbite zvezde u odnosu na ravan planetezimalnog diska (i_p), i brzina kretanja sekundarne zvezde u pericentru (V_p). Prolazak zvezde je šematski prikazan na Slici 6. 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 direktnе prolaske (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). Sa 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.

Sa obzirom na to da je planetezimalni disk simetričan u ravni, longituda perihela zvezde je proizvoljan parametar i ne utiče na bilo koji način na efekte samog prolaska. U prvih osam izvršenih simulacija (1. grupa simulacija, Tabela 3) pericentar susreta je bliže, na otprilike udaljenosti rasejanog Kajperovog pojasa u današnjem Sunčevom sistemu, a mi posmatramo uticaj samo na klasični deo Kajperovog pojasa. Tako da sekundarna zvezda samo prolazi *pored* diska čestica. Osnovna ideja ovih simulacija jeste da se istraži eventualni uticaj bliskog prolaska na današnji klasični Kajperov pojaz, koga mi danas najbolje razumemo jer većina pronađenih objekata u pojazu se nalazi baš u tom delu. To je i razumljivo, jer je on na najmanjoj udaljenosti od Sunca. Posmatranje uticaja na objekte koje se nalaze na udaljenosti identičnoj današnjeg klasičnog dela pojasa nam omogućava da pokušamo da oučimo karakteristike u sadašnjem

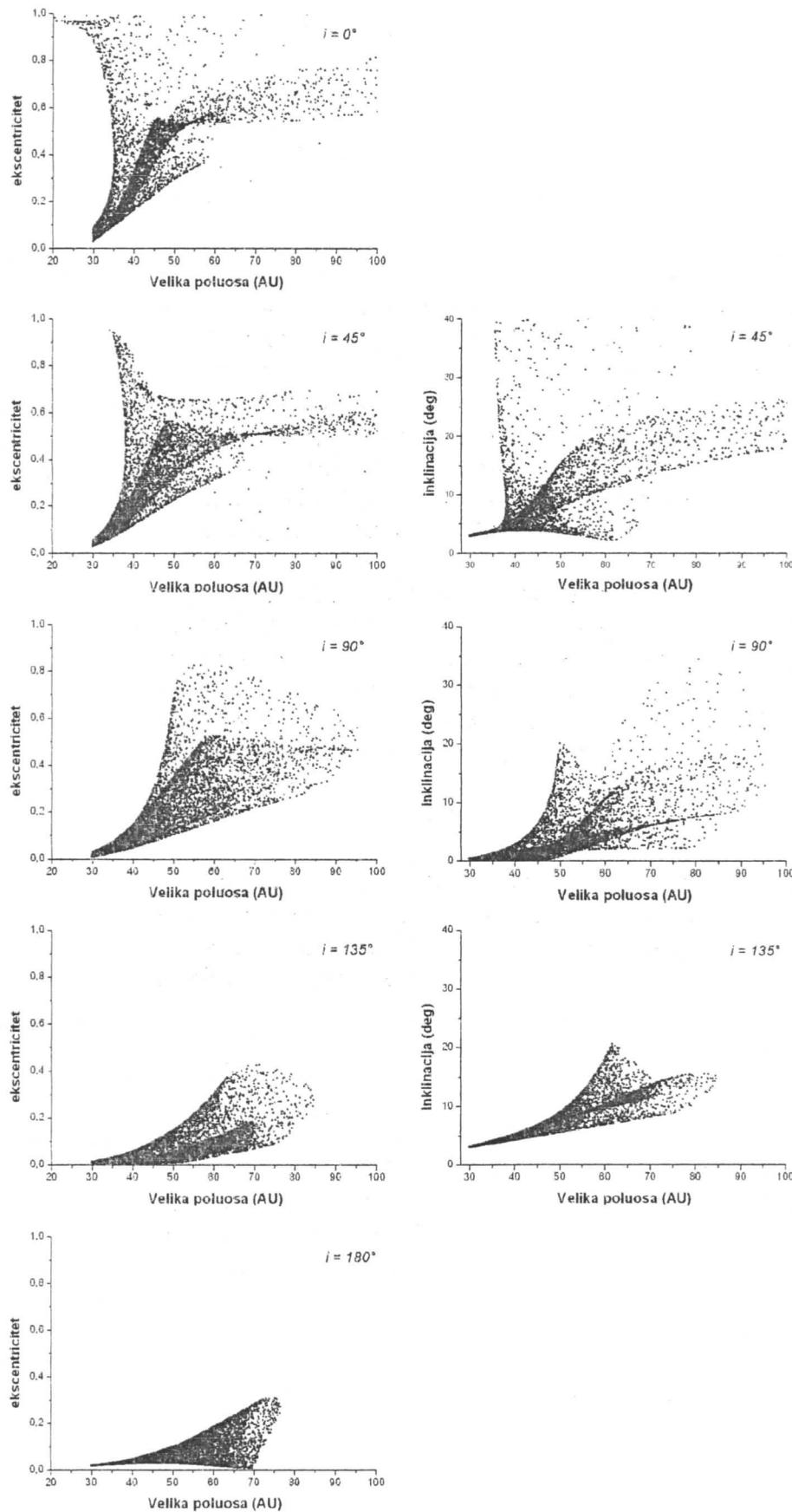
Kajperovom pojasu koje poreklo mogu da imaju baš u bliskom zvezdanom prolasku. Zbog toga nam je potrebno da izvršimo simulacije sa različitim geometrijama prolaska da bismo uočili kakav bi zvezdani prolazak možda mogao da objasni karakteristike Kajperovog pojasa. Od osam simulacija pet su koplanarne (od toga jedan je retrogradan.). To je najjednostavnija geometrija i najbolji način da se upozna uticaj zvezde perturbatora na planetesimalni disk. Pored toga, koplanarne prolaške smo iskoristili da bismo uvideli kako različita brzina perturbatora utiče na disk, ali i šta donose različite udaljenosti pericentra (mada samo blaže pomerane). U prvih osam, tri prolaska su sa inklinacijama od 45° , 90° i 135° . Tj. pokušavamo da istražimo uticaj perturbatora koji ima orbitu pod nagibom u odnosu na disk planetesimala. Zbog toga izvršavamo jedan direkstan, jedan retrogradan i jedan vertikalni prolazak. Posle simulacija na objekte bliže centralnoj zvezdi, pažnju posvećujemo uticaju zvezde perturbatora na objekte na udaljenosti današnjeg spoljnog Kajperovog pojasa i unutrašnjeg Ortovog oblaka (2. grupa simulacija, Tabela 3). O tim objektima danas nemamo puno informacija, pa nam baš informacije dobijene iz simulacija mogu pomoći u otkrivanju karakteristika ovih udaljenih delova Sunčevog sistema. Pericentar ovih prolazaka je u spoljnem Kajperovom disku i simuliramo jedan prolazak sa inklinacijom od 30° i dva koplanarna prolaska, od kojih jedan direkstan i jedan retrogradan. U ovim prolašcima sekundarna zvezda prolazi *kroz* sam disk čestica. Svi simulirani zvezdani prolašci su opisani u Tabeli 2.

Simulacija	Grupa simulacija	Inklinacija	Udaljenost pericentra (AJ)	Brzina u pericentru (km/s)
1.	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
9.		0°	350.4	4.27
10.		30°	356.8	4.74
11.		180°	350.4	4.27

Tabela 3 – U tabeli su opisani simulirani prolašci. Parametri simulacija su redni broj simulacije, inklinacija sekundarne zvezde u odnosu na planetesimalni disk, udaljenost pericentra zvezde i brzina zvezde u pericentru.

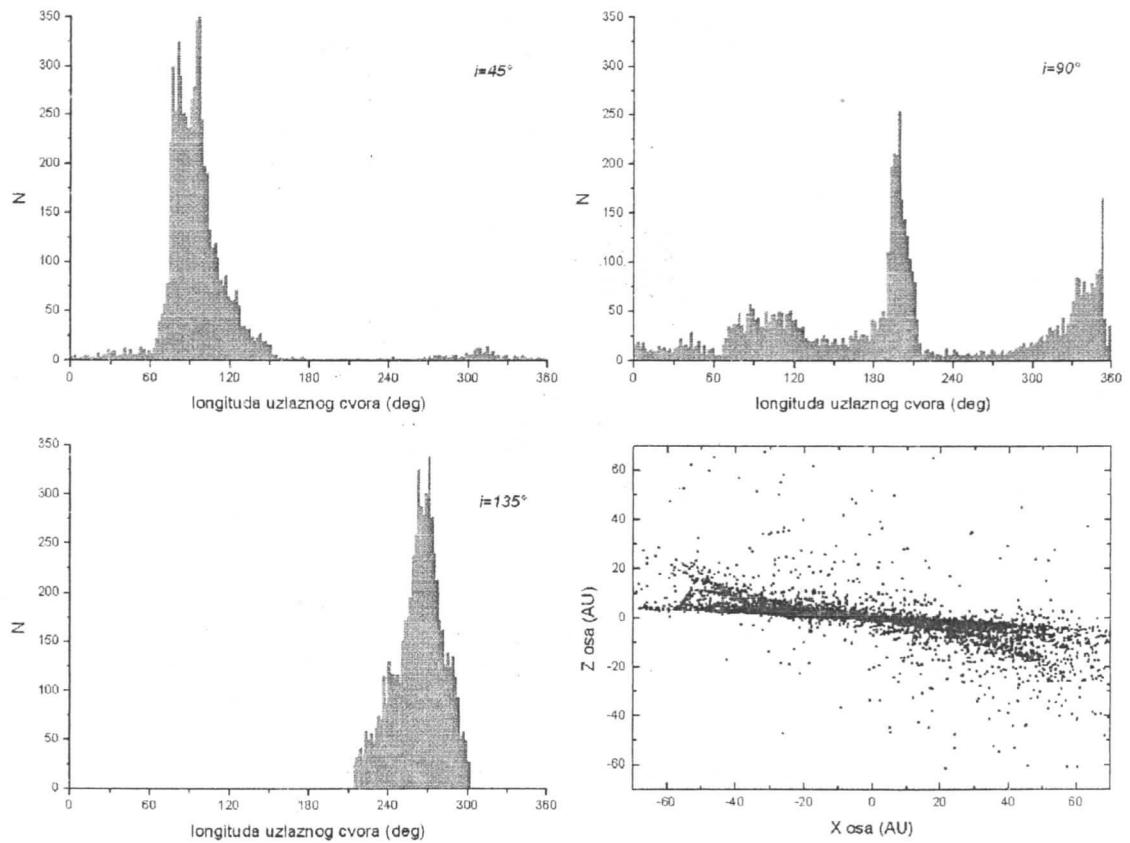
Rezultati

Tipičan prostorni prikaz planetesimalnog diska u poslednjem koraku simulacije je predstavljen na Slici 12. I na prvi pogled uočava se snažna perturbacija izazvana prolaskom zvezde. Da bi se podrobije razumele karakteristike i posledice prolaska potrebno je detaljnije razmotriti karakter promene diska planetesimala. Razmatranjem promena pojedinačnih orbitalnih momenta se najbolje mogu opaziti karakter i intezitet celokupnog delovanja zvezde prilikom susreta.



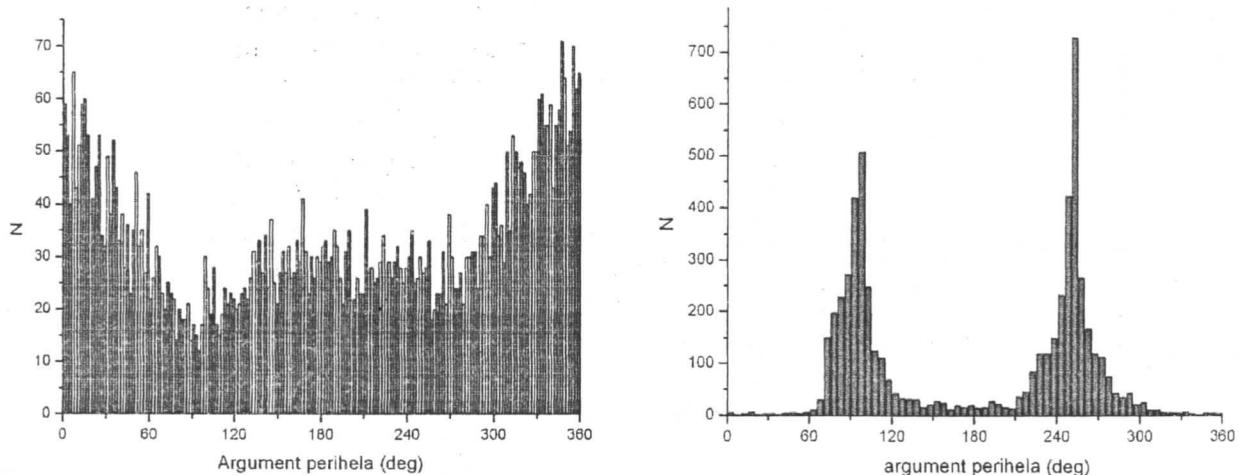
Slika 7 – Na levoj i desnoj koloni predstavljene su promene ekscentriciteta i inklinacije planetezimala posle bliskog prolaska simulacija grupe 1. sa razlicitim inklinacijama orbite zvezde (naznaceno na graficima) koja je prošla na udaljenosti pericentra $q = 121.4$ AJ i brzinom $V = 3.35$ km/s. Uočljivo je da su jače promene prilikom prolazaka sa manjim vrednostima inklinacije.

Najjednostavnija geometrija prolaska se javlja pri koplanarnim prolascima, tj. prolascima „u dve dimenzije”. Tačnije tada se ravan putanje zvezde podudara sa ravni diska objekata, i pri takvom prolaskom 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 duž Z-ose, pa im se menja i sam nagib orbite u odnosu na početnu ravan diska, tj. menja im se i inklinaciju pored ekscentriciteta. Promena ekscentriciteta i inklinacija planetezimala prilikom susreta je prikazana na Slici 7. Uočljivo je da bliski zvezdani prolasci značajno povećavaju ove orbitalne elemente, ali i da orbite različitih objekata imaju značajno različite promene vrednosti ova dva parametra. To ponajviše zavisi od samog položaja objekata u odnosu na perturbatora. Takođe se vidi da direktni prolasci imaju znatno veći uticaj, a za razliku od njih retrogradni prolasci samo neznatno povećaju ekscentricitete i inklinacije objekata, što se može objasniti dužinom vremena tokom kojeg je jedan planetezimal u blizini perturbatora, kada on na objekat ima veoma snažan uticaj. Ako se smer kretanja objekata i zvezde poklapa, oni će imati relativne brzine značajno manje nego ako im se smer kretanja razlikuje jer će tad u neposrednoj blizini biti dosta duži vremenski period. Uticaj zvezde na objekte je različit i zavisi od više parametara: različito je dejstvo u zavisnosti od njihove udaljenosti od Sunca, onda od položaja u samom sistemu, i konačno u



Slika 8 – Raspodela longitude uzlaznog cvora posle prolazaka sa različitim inklinacijama (naznačena na graficima), pericentrom na $q = 121.4$ AJ, brzinom $\dot{V} = 3.35$ 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

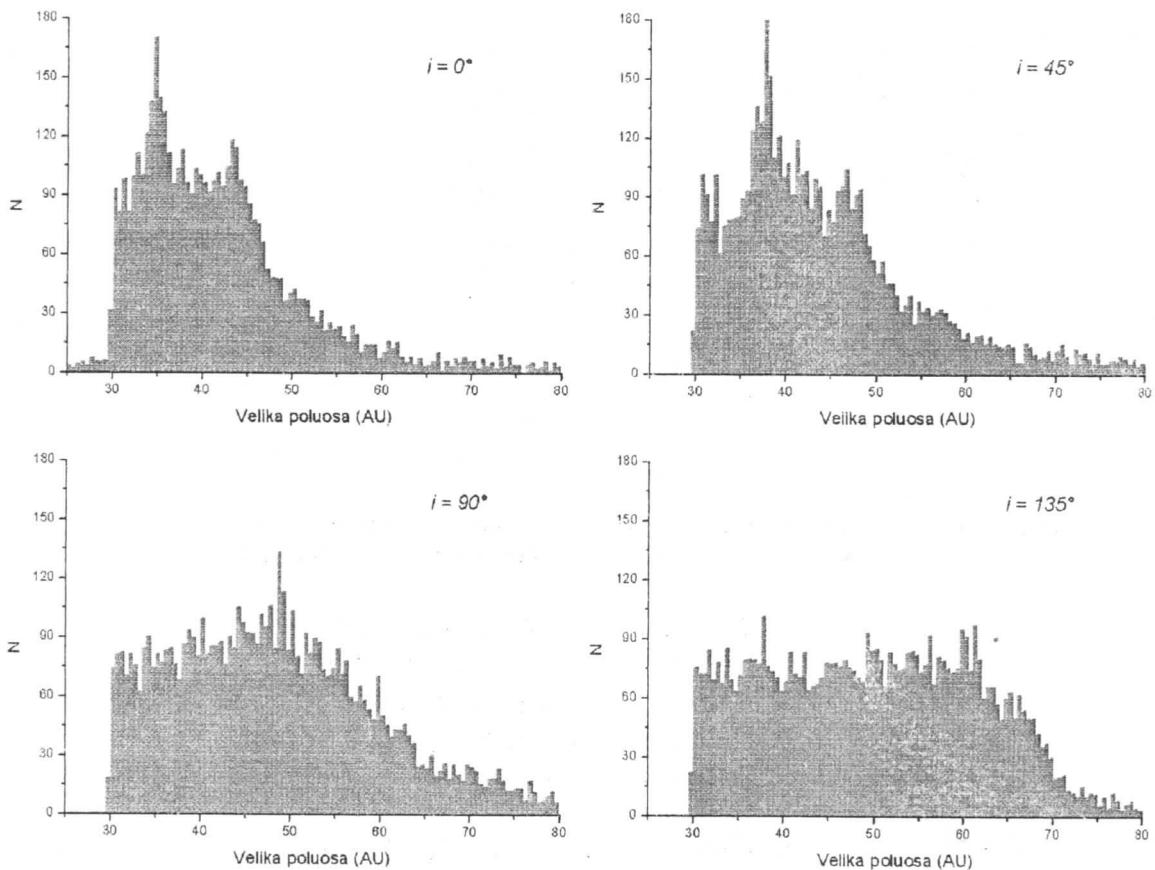
odnosu na zvezdu koja prolazi. Planetezimalima na manjim rastojanjima od Sunca su promene manje, a uticaj na njih je ujednačeniji što se objašnjava velikom orbitalnom brzinom i kraćim periodom revolucije, tako da su i kraće vreme pod jačim uticajem perturbatora. Na taj način se svi ovi objekti približe zvezdi na malo rastojanje samo dok je ona najbliža disku. Na udaljenije objekte od Sunca, uticaj prolaska na vrednosti ekscentriciteta i inklinacija mnogo više zavisi od položaja čestice u disku, na strani bliže pericentru prolaska uticaji su najizraženiji, dok su na suprotnoj strani pojasa primetno manji. Što se objašnjava njihovom malom orbitalnom brzinom i velikim obimom orbite, tako da oni mogu da za relativno kratko vreme ukupnog bliskog prolaska da prođu samo kroz mali deo protoplanetarnog sistema i ostanu van dometa uticaja sekundarne zvezde. Zbog toga od orbite zvezde zavisi da li će ona se približiti planetezimalu koji je daleko od matične zvezde. Jedino je kod retrogradnog koplanarnog prolaska uticaj na ekscentricitet ujednačen sa obe strane, jer su kod takvog prolaska relativne brzine između planetezimala i perturbatora najveće, pa i perturbator zato utiče na veći broj čestica. Kod svih ostalih simulacija primetna je različita jačina promene na suprotnim stranama diska. Kada se dobijene raspodele sa Slike 7 uporede sa sadašnjom raspodelom sa Slike 2, uočava se da se sa trenutnim vrednostima ekscentriciteta i inklinacija objekata u sadašnjem Kajperovom pojusu najbolje slažu uticaji direktnih prolazaka. Zvezdani prolazak dobro objašnjava postojanje objekata i sa većim vrednostima inklinacija i ekscentriciteta u sadašnjoj raspodeli pojasa, a takođe i objekte sa nižim vrednostima ovih orbitalnih elemenata, jer prolazak stvara orbite sa dosta velikim rasponom vrednosti inklinacija i ekscentriciteta.



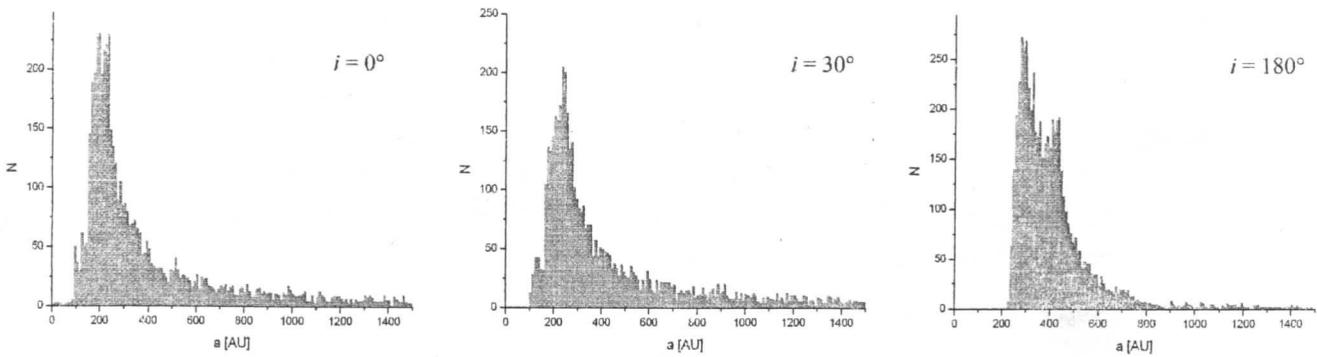
Slika 9 – Raspodela argumenta perihela posle Simulacije 4 (a) i posle Simulacije 11 (b) bliskog prolaska

Vrednosti longitude uzlaznog čvora su prikazane na Slici 8. Posle zvezdanih prolazaka interval vrednosti ovog orbitalnog elemenata koje dobiju objekti je veoma mali, odnosno prolazak orijentiše putanje planetezimala na taj način da u istom delu diska seku orbitalnu ravan. Na taj način vrednosti nekih orbitalnih parametara orbita planetezimala počinju na neki način prate i preslikavaju vrednosti istih tih elemenata orbite perturbatora. Ipak kod direktnog susreta jedan deo čestica ima vrednosti longituda koje su izvan glavnog intervala, mada broj takvih objekata nije velik. U prostornoj raspodeli planetezimala ovaj efekat je uočljiv u vidu blage nagnutosti diska čestica posle prolaska. U današnjem Kajperovom pojusu, kao ni Ortovom oblaku ovakva raspodela longitude uzlaznog čvora nije vidljiva. Ova pojava je verovatno

karakteristična za period neposredno posle prolaska dok su perturbacije i dalje dominantne u prostornoj raspodeli, a kasnije usled dinamičkog haosa ovaj efekat postaje neprimetan.

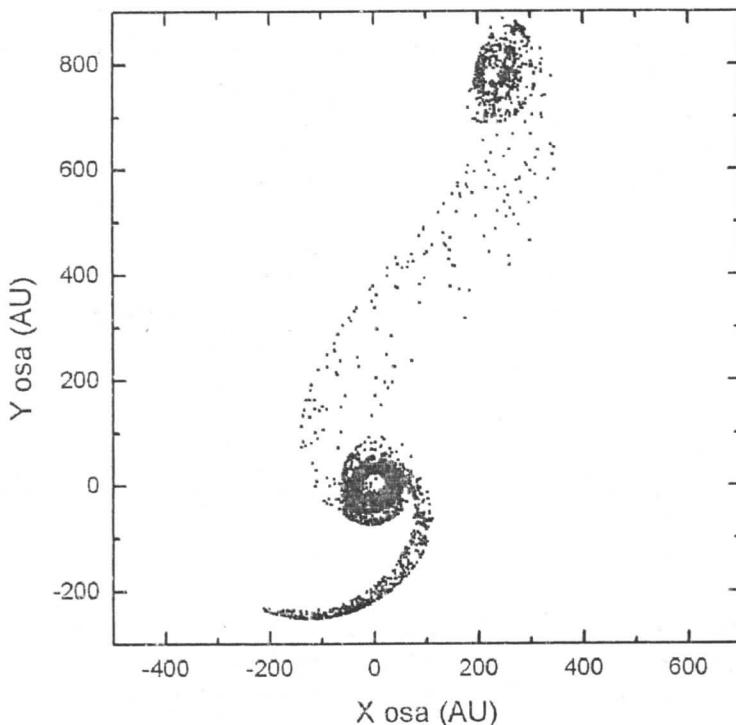


Slika 10 – Raspodela velikih poluosa za različite prolaske grupe 1.simulacije čije su inklinacije naznačene na graficima. Parametri susreta su: udaljenost pericentra $q = 121.4$ AJ, brzina prolaska $V_p = 3.35$ km/s. Uočava se smanjivanje broja objekata u spoljašnjem delu planetezimnalnog diska i formiranje ivice.



Slika 11 - Raspodela velikih poluosa za različite prolaske grupe 2 simulacije čije su inklinacije naznačene na graficima.

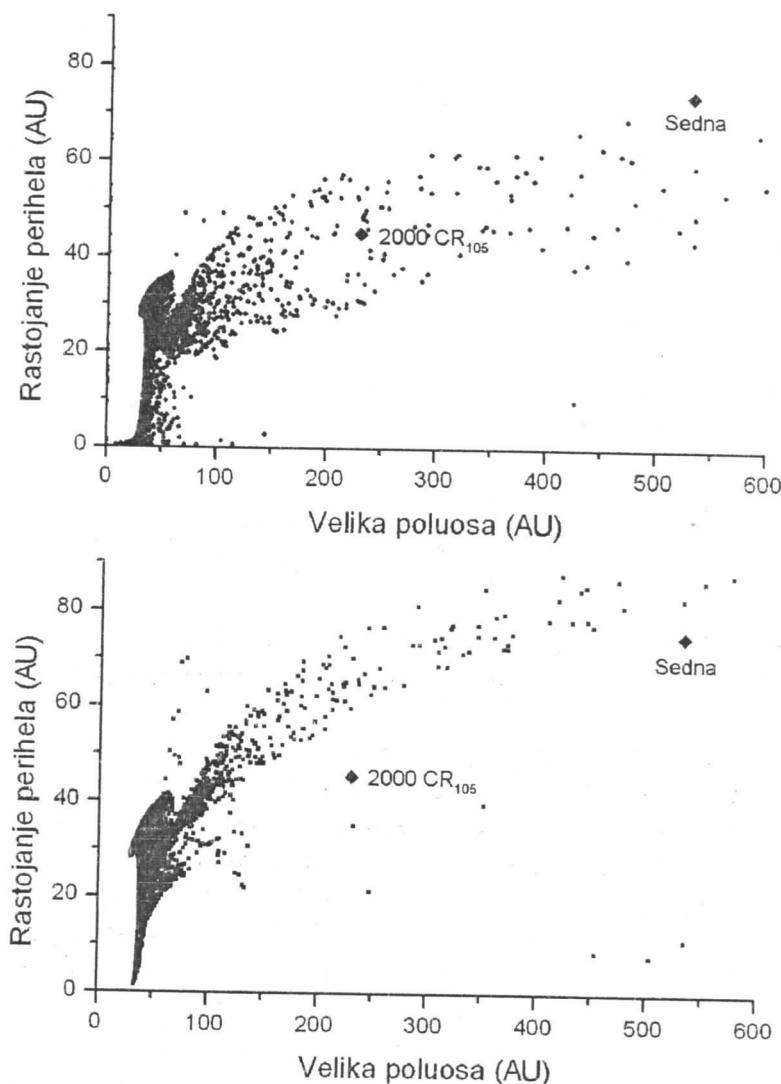
Raspodela argumenta perihela data je na Slici 9. Efekat bliskog prolaska na argument perihela čestica je isti kod gotovo svih izvršenih simulacija (osim za Simulaciju br. 11) i karakteriše ga orijentacija ovog orbitalnog elementa u jednom smeru, ka pericentru susreta. Posle retrogradnog prolaska grupe simulacija 2. ceo pojas se značajno više proširi i objekti se više grupišu u dva začetka spiralnog kraka (od kojih samo jedan se zaista i razvije) što potvrđuje i raspodela argumenta perihela koji se razvaja u dva pika udaljeni jedan od drugog 180° (Slika 9b). Efekat sličan kao kod vrednosti longitude uzlaznog čvora gde orbite objekata dobijaju neke karakteristike orbite samog perturbatora. Trenutna raspodela argumenta perihela objekata u spoljnem Sunčevom sistemu ne oslikava efekte zvezdanog prolaska prolaska na ovaj orbitalni element, kao što je slučaj i kod prethodno analiziranog orbitalnog elementa.



Slika 12 -- 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 proslaska je pojava spirale. Međutim, spirala je samo kratkoročna formacija posle prolaska.

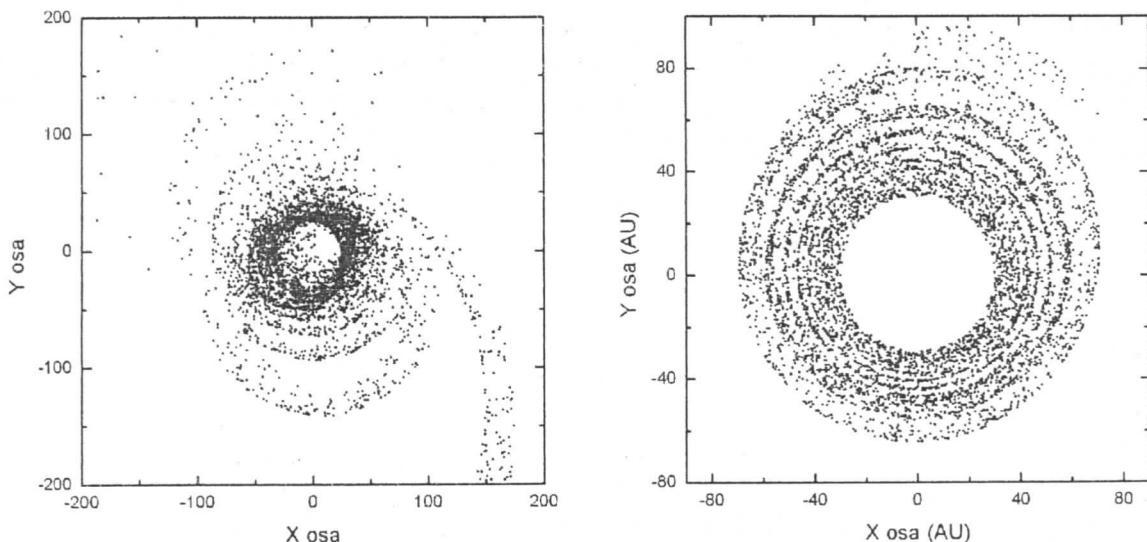
Raspodela objekata po velikoj poluosni nam govori koliko je objekata ostalo na određenim rastojanjima od Sunca posle prolaska zvezde. Time nam direktno ukazuje na jačinu efekta zvezdanog prolaska, jer možemo da uporedimo na kojim udaljenostima od matične zvezde je efekat perturbatora bio dovoljno snažan da promeni vrednosti veliku poluose planetezimala, ili čak izbací obejakt iz sistema. Početna raspodela ovog orbitalnog elementa je bila ravnomerana, 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 10 i Slici 11. Za retrogradne prosliske raspodela po velikoj poluosni se nije drastično menjala, za razliku od direktnih prolazaka. Zaključak je da su direktni susreti uticajniji i razorniji po disk planetezimala

s obzirom na to da je promena velikih poluosa posle njihovog uticaja mnogo veća. Objekti kojima se velika poluosa promenila najviše su oni sa većom početnom velikom poluosom orbite, tj. da su udaljeniji od matične zvezde i time slabije vezani za njen gravitaciono polje, a još je bilo potrebno da perturbator prođe sa njihove unutrašnje strane, tj. rastojanju manjem od njihove udaljenosti od centralne zvezde, tačno između nje i objekta.



Slika 13 - Grafici zavisnosti rastojanja perihela planetezimala od srednje udaljenosti od Sunca. Gornji grafik se odnosi na Simulaciju br. 1., a donji grafik na Simulaciju br. 2. Na grafiku su ucrtani i objekti 2000 CR₁₀₅ i Sedna, članovi proširenog rasejenog diska čije orbite može da objasni uticaj bliskog prolaska.

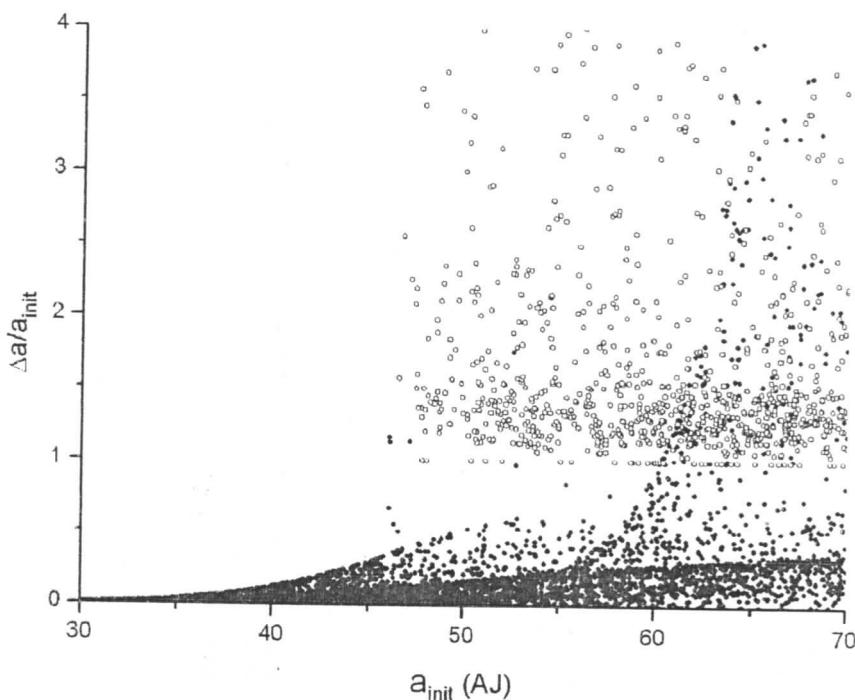
Rezonantni efekti nisu došli do izražaja prilikom simuliranih bliskih prolazaka, iako su po Ostrajkeru (Ostriker 1994) ovakvi efekti važni tokom prolazaka i treba da se javi između orbitalne frekvencije planetezimala i orbitalne frekvencije sekundarne zvezde kada se nalazi u pericentru, međutim bliski susret ne daje dovoljno vremena ni da planetezimali bliži Suncu ne stignu da naprave neki veći broj revolucija. Takvi efekti bi se sigurno pojavili da se radi o prolasku kada su obe zvezde članice dvojnog sistema i kad bi se bliski prolasci periodično ponavljali u zavisnosti od perioda potrebnog za obilazak oko zajedničkog centra mase.



Slika 14 – Prostorna raspodela objekata na x-y ravan posle Simulacije 6. (a) i Simulacije 5. (b) na kojima se uočavaju strukture u pojusu nastale bliskim zvezdanim prolaskom.

U prostornoj raspodeli objekata prilikom zvezdanog prolaska nastanu istaknute spiralne i prstenaste strukture. Najuočljiviji efekat bliskog prolaska je pojava vrlo izražene spirale (Slika 12) čiji se krak izduži pri prolasku zvezde i do 4.000 AJ (na kraju simulacije, ali posle i preko 20.000 AJ za čega je potrebno više vremena od simuliranog, jer ti objekti imaju jako dugačak period revolucije). Time imamo direktni prenos objekta između Kajperovog pojasa i Ortovog oblaka. Objekti iz klasičnog dela diska (1. grupa simulacija) dosegnu i 800 AJ, tako da je moguć transfer iz klasičnog pojasa u oblast unutrašnjeg Ortovog oblaka. Kod klasičnog dela pojasa spiralna struktura se javlja samo pri direktnim prolascima i nije nastala u Simulaciji 8. tokom prolaska sa pericentrom $q = 197$ AJ što znači da se ne javlja pri susretima kad je približno odnos $a/q > 3$ (odnos udaljenosti spoljne ivice i pericentra sekundarne zvezde). Kod 2. grupe simulacije kod prolazaka kroz pojas čestica, spirala se javlja i kod retrogradnog prolaska (jer je ovom prilikom a/q jednak nuli), jer treba imamo u vidu da je kod ovih simulacija perturber prošao pravo kroz disk čestica. Objekti u spirali su na velikim udaljenostima, ali imaju veoma izdužene putanje tako da se približe planetском regionu u trenucima kad su najbliže Suncu, u perihelu (Slika 13) (ali ne i objekti iz simulacije br. 11 u čijem spiralnom kraku objekti imaju uglavnom hiperbolične orbite (Slika 21)). Kod direktnih prolazaka grupe 2. simulacije imamo jedan moćan spiralni krak koji se proteže izuzetno daleko od Sunca i koji može da odnese objekte na velika rastojanja, ali takođe i imamo puno objekata koji se raseju samostalno, a i dalje imaju eliptičnu orbitu. Objekti u spiralnim kracima bi se mogli povezati sa objektima u današnjem proširenom rasejanom pojusu. Na Slici 23 ucrtani su dva objekta iz proširenog rasejanog pojasa, 2000 CR₁₀₅ ($a = 230$ AJ, $q = 44.4$ AJ) i Sedna ($a = 531$ AJ, $q = 74.4$ AJ), i uočava se sličnost njihovih orbita sa orbitama objekata u spirali. Prstenastih struktura koje se javljaju kod klasičnog dela pojasa ima dva oblika: jedan koji se nalazi u samom glavnom delu pojasa (slika 14b) i drugi koji se stvara na većem rastojanju i koji je nagnut pod uglom koji određuje inklinacija prolaska (slika 14a). Prvi oblik je mnogo izraženiji pri retrogradnim prolascima i nastaje kao rezultat indirektnе sile zvezde iz jednačine kretanja planetezimala, javlja se kao velik broj prstenova u samom pojusu (Larwood & Kalas 2001). Nasuprot tome, drugi oblik se javlja samo pri direktnim prolazima, jer je snažno povezan sa pojmom spirale. Javljuju se više prstenova, koji su

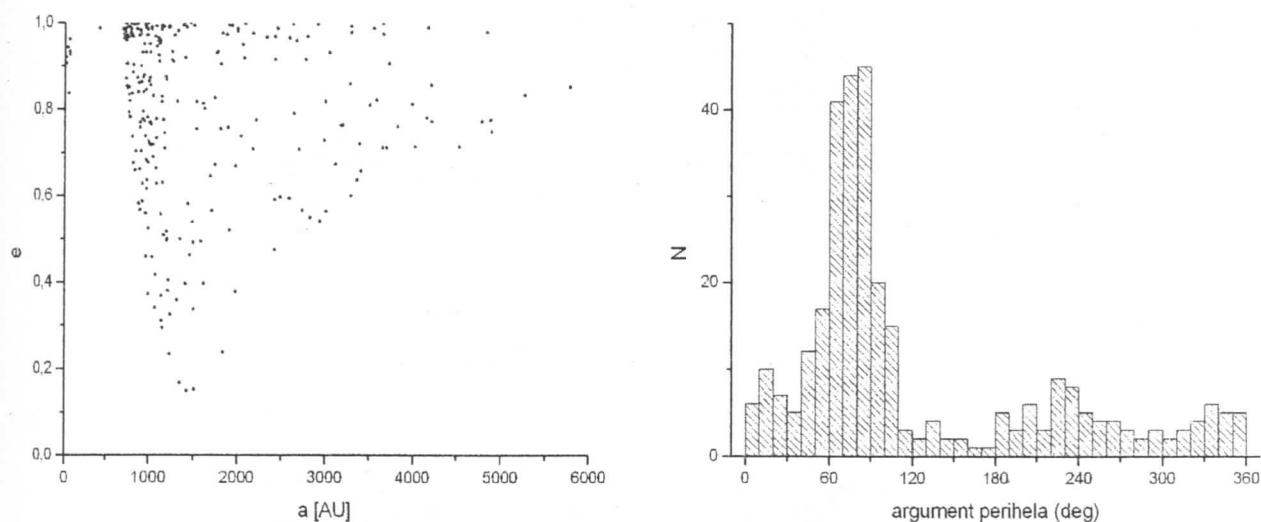
izduženog oblika i istaknutiji su sa strane na kojoj počinje da se grana spirala, uočavaju se kao grananje iz glavnog dela pojasa; stvaranje ovih prstenova je rezultat zajedničkog delovanja i direktne i indirektnе sile iz jednačine kretanja (Larwood & Kalas 2001). I spiralne i prstenaste strukture su kratkoročne i nestaju usled dinamičke evolucije u pojasu. Kod simulacije grupe 2. spirala se javila kod sva tri prolaska.



Slika 15 – 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.

Postoji više mehanizama da planetezimali napuste Sunčev sistem usled uticaja zvezdanog prolaska na protoplanetarni disk. Zvezdani prolazak povećava ekscentricitet orbita u pojusu i za vrednosti $e > 1$ objekat više nije gravitaciono vezan za Sunce. Drugi mehanizam je direktno zarobljavanje planetezimala u orbitu oko sekundarne zvezde. Treći mehanizam se javlja tek posredstvom velikih planeta, prvenstveno Neptuna. Orbite sa većim ekscenticitetima 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 izbaciti ga iz pojasa. Ovaj proces se dešava posle zvezdanog prolaska i traje desetinama i stotinama godina. On nije deo simulacije koja je vršena, tako da ovde možemo uporediti samo prva dva mehanizma. Mehanizam koji može da iznese najviše materijala iz pojasa prilikom prolaska je izbacivanje iz sistema hiperboličnom putanjom, tj povećanjem ekscentriciteta na $e > 1$. Simulacije iz 2. grupe gde zvezda direktno prolazi kroz disk čestica pokazuju da je na ovaj način moguće izbaciti iz sistema i par desetina procenata od celog diska. Procenat izbačenih objekata je u Tabeli 5., ali treba imati u vidu da je simulirani disk samo deo celokupnog protoplanetarnog diska. Zbog toga možemo govoriti samo o procentima izbačenih objekata u delovima celokupne strukture diska, pa npr. znamo da zvezdani prolazak (određenih

karakteristika) može izbaciti i do 30% objekata iz klasičnog diska Kajperovog pojasa, ili čak do 50% objekata iz spoljnog Kajperovog diska i unutrašnjeg Ortovog oblaka. Zarobljavanje planetezimala od strane sekundarne zvezde kao proces je efikasan samo pri prolascima kada su brzine planetezimala slične brzinama perturbatora, tj. kada su relativne brzine manjih vrednosti. Pri simuliranim prolascima, to se podudaralo kod objekata klasičnog pojasa (simulacije grupe 1.). Kod udaljenijih objekata od Sunca (simulacije 2. grupe) procenat planetezimala koje je zarobila sekundarna zvezda je relativno mali (Tabela 5).



Slika 16 – Grafik zavisnosti velike poluose od ekscentriciteta objekata koji su zarobljeni u novom sistemu (16a), kao i njihova raspodela argumenta perihela (16b)

Kod 1. grupe simulacija zarobljavanja planetezimala 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 strane sekundarne zvezde brojčano je izražena u Tabeli 4. Samim direktnim zvezdanim prolaskom izbacici se 3-20% čestica iz pojasa, ali taj procenat se poveća preko kasnijih mehanizama prouzrokovanim efektima samog bliskog susreta. Iz Tabele 4 je uočljivo 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 $a > 47$ AJ 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. Ipak, iz Tabele 4 se vidi da je zarobljavanje objekata direktno povezano sa pojmom spirale. U onim, prolascima gde se spirala nije javila, nije ni došlo do preuzimanja objekata od strane sekundarne zvezde

Objekti koje zarobi sekundarna zvezda u novom sistemu oko nje imaju prilično različite orbite (Slika 16). Posle Simulacije 9 iz grupe 2 simulacija velike poluose objekata iznose oko 1000 AJ i nešto preko, a ekscentriciteti su različiti, od gotovo kružnih orbita do kvaziparaboličnih (kojih ima nešto više) (Slika 16a). Ove orbite su uglavnom orijentisane u jednom pravcu, slično kao kod objekata koji su ostali u matičnom disku, s tom razlikom da je u novom sistemu jedan smer favorizovan, na šta nam kazuje raspodela argumenta perihela kod

ovih orbita (Slika 16b). Postoji svega par objekata sa manjim poluosama, ali oni imaju i velike ekscentricitete, pa imaju relativno nestabilne orbite koje se mogu još promeniti u postfazama prolaska.

Simulacija	Procenat zarobljenih čestica
1.	14%
2.	8%
3.	0.2%
4.	0%
5.	0%
6.	19%
7.	13%
8.	2%
9.	3%
10.	2%
11.	2%

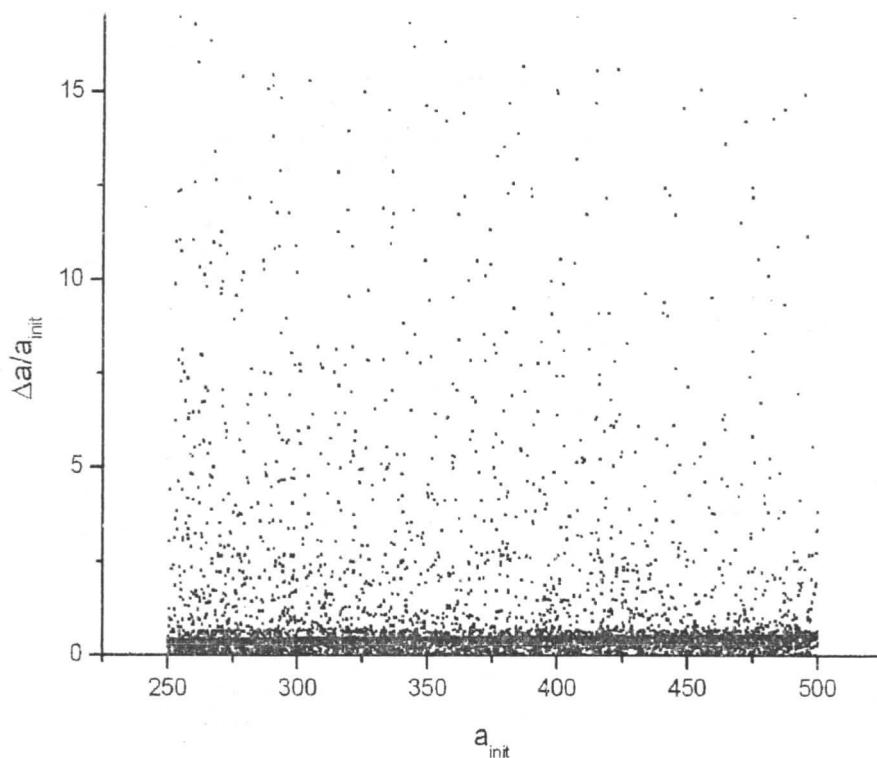
Tabela 4 – Procenat zarobljenih planetezimala oko sekundarne zvezde u simuliranim prolascima.

Simulacija	Procenat izbačenih čestica (bez zarobljavanja)
9.	45%
10.	35%
11.	28%

Tabela 5 – Procenat izbačenih planetezimala 2. grupe simulacija, neračunajući objekte zarobljene od strane sekundarne zvezde

Iz raspodele vrednosti ekscenticiteta posle prolaska vidi se da je intezitet perturbacije prilikom bliskog prolaska veoma jak. Od početnih kružnih putanja objekata, posle susreta imamo čitav spektar ekscenticiteta. Nivo perturbacije vidimo i po raspodeli promene velike poluose (Slika 15 i 17). Nove orbite su često toliko izdužene da se u perihelu približe i unutrašnjem Sunčevom sistemu. Zanima nas koliko kometa ima takve orbite da može da uđe i unutar Zemljine, jer tad postoji mogućnost presecanja orbita i eventualnog sudara kometskog objekta i Zemlje. Broj kometa koje bi mogle da udare o Zemlju mogu da daju odgovore na pitanja vezane za pojavu vode na Zemlji. U Tabeli 6 je prikazano koliko objekata je iz prvobitnog diska posle simulacije imalo perihele unutar Zemljine putanje, tj. $q < 1 \text{ AJ}$. To su samo objekti koji direktnim uticajem prolaska dobiju perihele tako blizu Sunca. Međutim, posle prolaska daljom dinamičkom evolucijom i međusobnom interakcijom tela, mnogi od ovih kometskih objekata koji s orbitama neposredno posle bliskog prolaska nisu mogli da prođu u planetarni sistem, mogu da steknu takve putanje koje ih dovode u unutrašnji Sunčev sistem i u blizinu Zemljine orbite. Kod koplanarnog prolaska oko pola promila od početnog broja objekata dospe unutar jedne astronoske jedinice od Sunca. U direktnom susretu nešto više, 0,64 % objekata ima perihele tako blizu Sunca, dok kod retrogradnog prolaska tačno pola promila, tj. 50 od 10.000

objekata bi preseklo Zemljinu orbitu. Interesantan nalaz je da perturber sa nagnutom orbitom (inklinacija 30°) nije uspeo nijedan kometski objekat da dovede na rastojanje od Sunce na manje od 1 AJ. Objekat sa najmanjim perihelom je imao $q \approx 11$ AJ, što bi u sadašnjem Sunčevom sistemu odgovaralo udaljenosti Saturna od Sunca. Gotovo svi objekti koji dođu na ispod 1 AJ imaju kvaziparabolične putanje (Slika 18), s tim što objekti posle retrogradnog prolaska imaju neznatno izduženje orbite. To dovodi do zaključka da retrogradni prolazak šalje objekte ka putanji Zemlje sa veće udaljenosti što se može i videti na Slici 19 gde su predstavljene velike poluose ovih objekata.

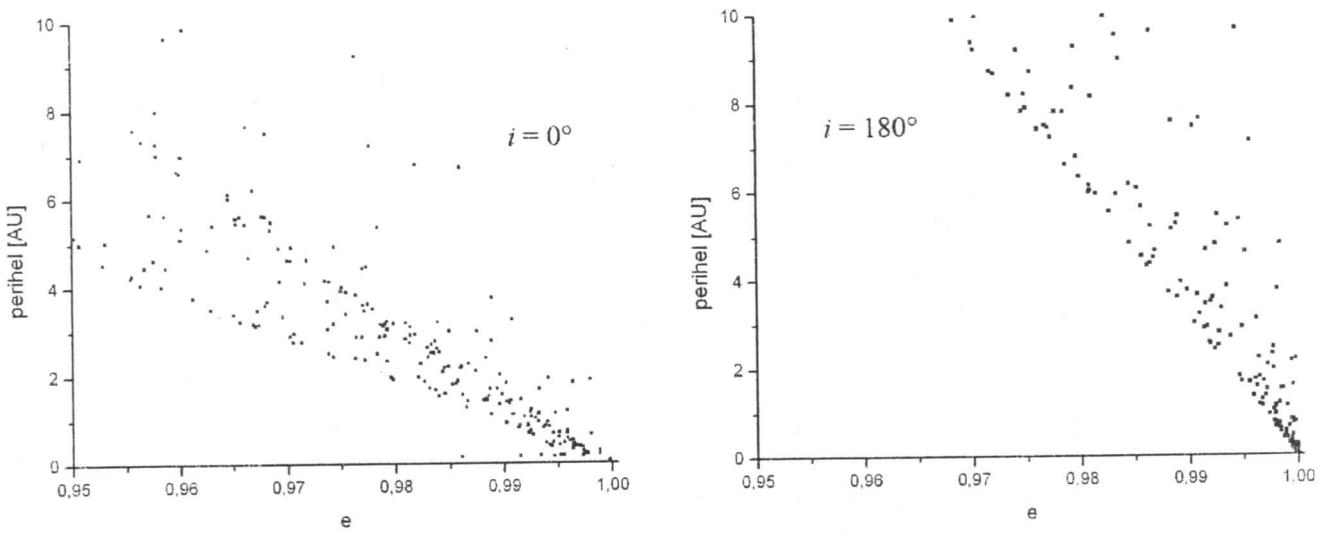


Slika 17 - Grafik zavisnosti relativne promene velike poluose objekata od početnih vrednosti velike poluose za Simulaciju 9.

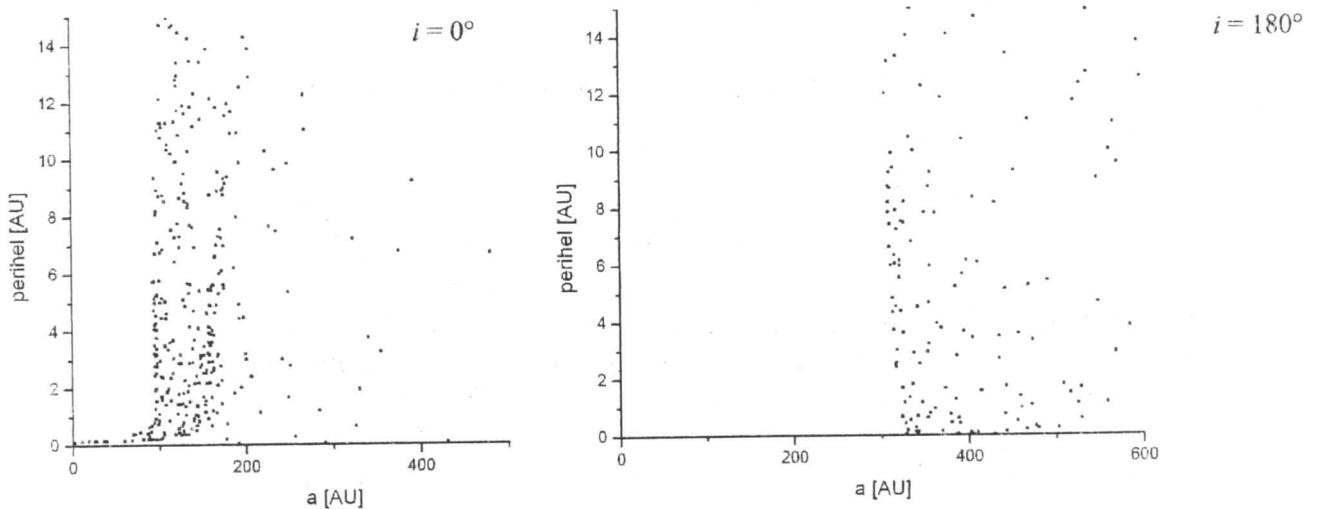
Simulacija	Procenat čestica sa $q < 1$ AJ
9.	0,64 %
10.	0 %
11.	0,50 %

Tabela 6 – Procenat planetezimala koji posle bliskog prolaska imaju perihele na rastojanju manjem od 1 AJ.

Zvezdani prolazak je uticao i na stvaranje i popunjavanje Ortovog oblaka. Neptun je planeta za koju se prepostavlja da je osnovno „oruđe“ za popunjavanje Ortovog oblaka (v. Popunjavanje – Ortov oblak). Stoga potrebno videti koliko objekata posle prolaska dolazi pod uticaj Neptuna, a koji bi ostali van tog uticaja bez perturbera koji prođe kroz pojaz planetezimala.



Slika 18 – Raspodela perihela objekata koji pridu unutrašnjem Sunčevom sistemu u odnosu na ekscentritete za prolazak sa inklinacijom 0° (a) i inklinacijom 180° (b)



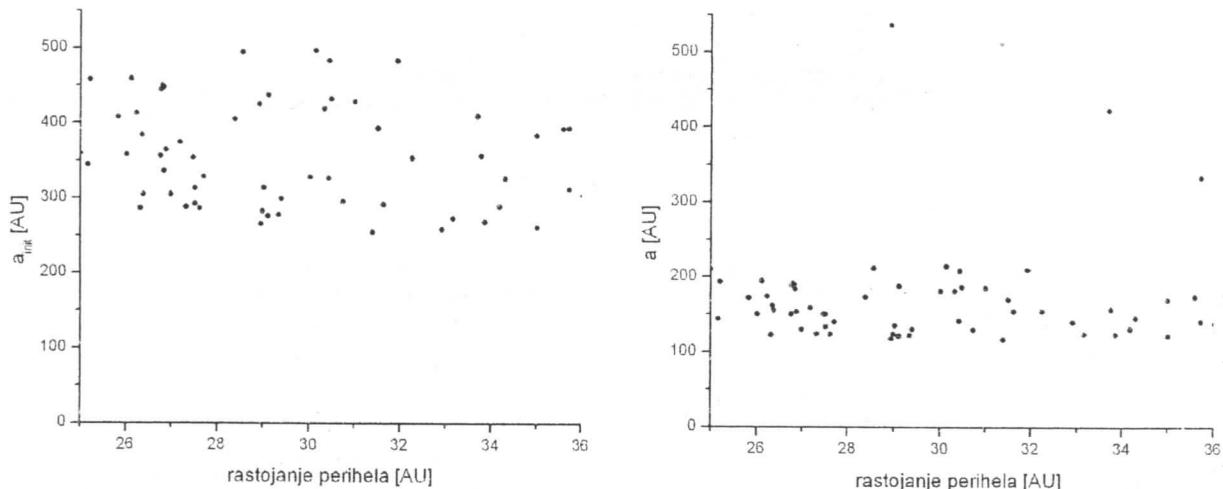
Slika 19 – Raspodela perihela objekata koji pridu unutrašnjem Sunčevom sistemu u odnosu na velike poluose za prolazak sa inklinacijom 0° (a) i inklinacijom 180° (b)

Podaci su dati u Tabeli 7. Od početnog pojasa u simulacijama grupe 1. koji se nalazio na 30-70 AJ nisu uzeti u obzir objekti koji su po početnim uslovima već sa perihelima $25 < q < 35$ AJ, da bismo uočili samo objekte koji bez zvezdanog prolaska se ne bi ni našli na ovim udaljenostima. Kod zvezdanog prolaska sa manjim rastojanjem pericentra ($q \approx 150$ AJ), veliki deo pojasa, čak oko 50%, dospe do udaljenosti na kojima će pre ili kasnije dospeti pod dejstvo Neptuna i velikih planeta, pod uslovom da zvezdani prolazak nema retrogradnu putanju. Kod većeg rastojanja pericentra ($q \approx 350$ AJ) i gde su posmatrani samo objekti na većim udaljenostima (250-500 AJ)

manje od 1% objekata dospe do uticaja planeta. U ovom slučaju nema razlike sa smerom kretanja sekundane zvezde, a objekti iz svih delova početnog diska mogu da dobiju ovakve perihele (Slika 20a), dok posle prolaska svi uglavnom imaju slične velike poluose (između 100 i 200 AJ) i ekscentricitete (Slika 20b).

Simulacija	Grupa simulacija	Procenat čestica sa $25 < q < 35$ AJ
1.		42,6 %
2.		55,2 %
3.	1.	47,8 %
4.		0,76 %
5.		0,68 %
9.		0,63 %
10.	2.	0,6 %
11.		0,85 %

Tabela 7 – Procenat planetezimala koji posle bliskog prolaska imaju perihele na rastojanju od 25 AJ do 35 AJ na kojima dolaze pod uticaj Neptuna.

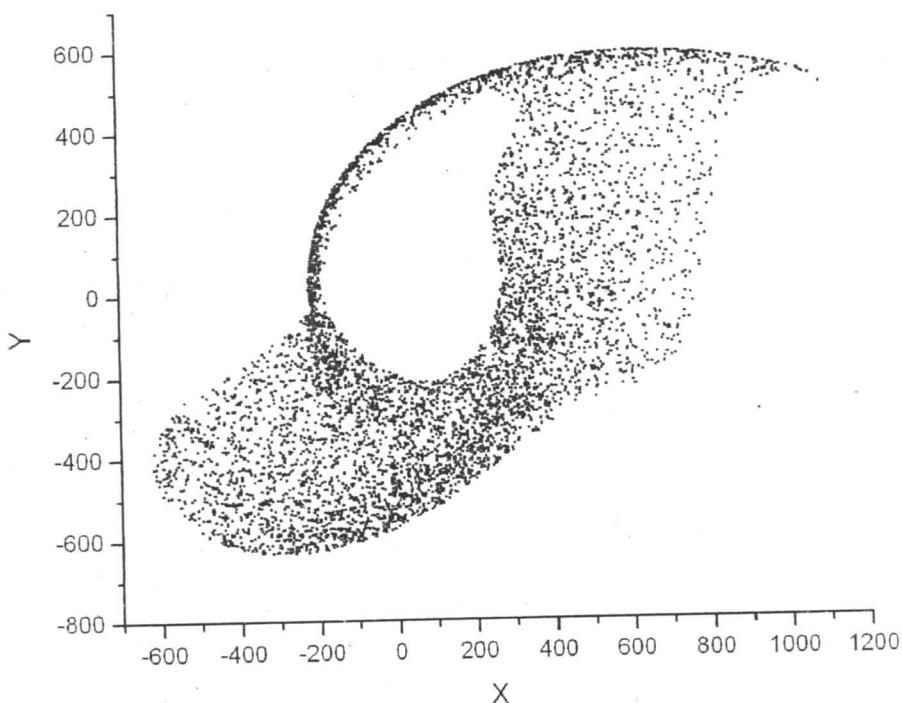


Slika 20 – Raspodela početne velike poluose u odnosu na perihele objekata između 25 AJ i 36 AJ (a) i raspodela krajnjih velikih poluosa takođe za iste objekte (b)

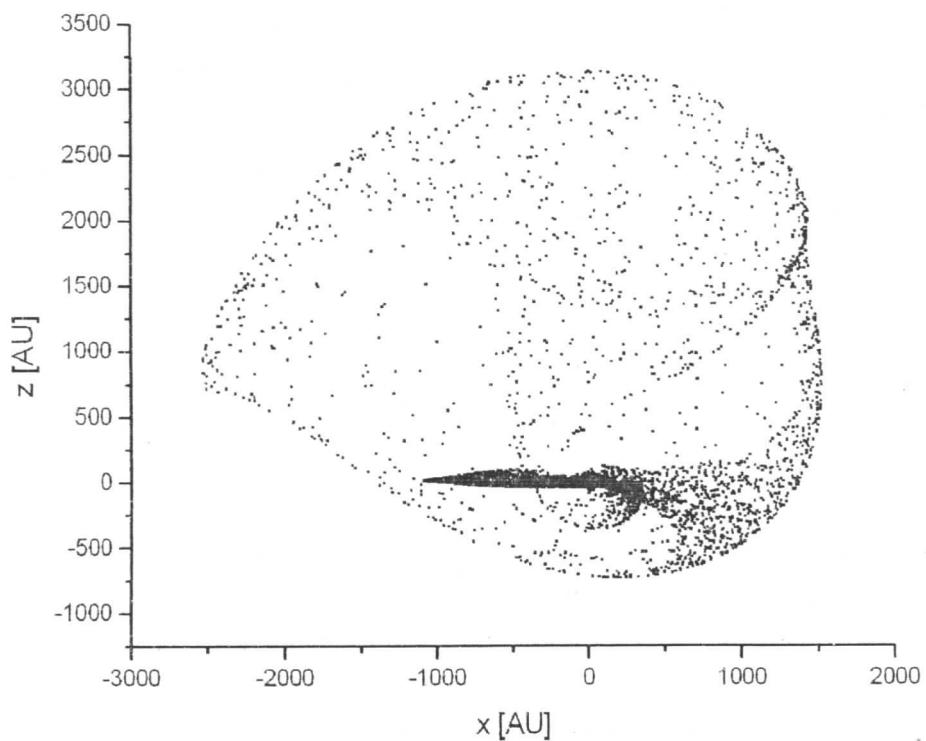
Perturber može i direktnim uticajem da poveća afele planetezimalima i tako da ih odbaci do rastojanja Ortovog oblaka gde preko uticaja Galaksije dobiju putanje koje su relativno stabilne u samom oblaku. U Tabeli 8 se nalazi koliko objekata iz 2. grupe simulacije, koji posle prolaska ostaju na eliptičnim putanjama oko Sunca, imaju afele veće od 20.000 AJ. Direktni prolasci izbacuju značajno više objekata, čak oko 7-8 puta više, do udaljenosti oblaka kometa nego retrogradni prolasci. I, čak, iz ovog regiona objekti višestruko lakše (možda čak i oko 10 puta) mogu da dođu do Ortovog oblaka, nego da se prvo približe planetarnom sistemu, pa odatle do oblaka kometa (uporediti Tabelu 6 sa Tabelom 5).

Simulacija	Objekti sa $Q > 20000$ AJ
9.	2,14 %
10.	2,3 %
11.	0,38 %

Tabela 8 – Procenat planetesimala koji posle bliskog prolaska se izbacuje na velike udaljenosti od Sunca ($Q > 20000$ AJ) a i dalje imaju eliptične putanje (odnosno graviraciono su i dalje vezani za Sunce).



Slika 21 – Prostorna rapsodela objekata u x-y ravni posle Simulacije 11 u kojoj su predstavljeni samo objekti koji su ostali u sistemu primarne zvezde. Uočljivo je nepostojanje spirale, odnosno svi objekti u spiralni imaju hiperbolične putanje.



Slika 22 – Prostorna raspodela objekata u x-z ravni posle Simulacije 10.

Diskusija

Simulacije su pokazale da bliski zvezdani prolazak u doba formiranja Kajperovog pojasa i Ortovog oblaka, dok je Sunce i dalje u početnom zvezdanom jatu, dovodi do pojava koje mogu da objasne određene dinamičke i strukturne odlike sadašnjeg Kajperovog pojasa, a mogu i da doprinosu boljem razumevanju dinamike kometskih objekata i strukture u spoljnem Kajperovom pojusu i unutrašnjem i spoljnem Ortovom oblaku, delovima Sunčevog sistema o kojima još uvek imamo malo podataka.

Simulirani prolasci na protoplanetarni disk utiču velikom jačinom. To je potpuno jasno, jer sekundarna zvezda velikom broju planetezimala pride na udaljenost koja je manja od njihovog rastojanja od Sunca za koje su objekti gravitaciono vezani. To znači da za kratak period prolaska sekundarna zvezda često nadavlada uticaj Sunca, što dovodi do velikih promena orbita i orbitalnih elemenata, a nije neuobičajno (čak u pojedinim simulacijama je gotovo i pravilo) da zvezda prosti otrgne velik procenat planetezimala od Sunčevog uticaja.

Planetezimalima se tokom susreta mogu povećati ekscentriteti i inklinacije do zaista velikih vrednosti, do raspodele koje su može uporediti sa današnjom u Kajperovom pojusu. Velike vrednosti tih orbitalnih elemenata u današnjem pojusu nisu mogle nastati samo usled formiranja planetezimala u akrecionom disku (Kenyon & Luu 1999), tako da se problem

pokušava rešiti dodatnim mehanizmima. A kao jedan od glavnih načina povećanja ekscentriciteta i inklinacije jeste i spoljni uticaj, tj. bliski zvezdani prolazak. Naročito zbog toga što se tokom potonje dinamičke evolucije vrednosti tih elemenata nisu puno promenile (Duncan et al. 1995), izuzimajući rezonatne objekte čije inklinacije se povećavaju tokom vremena zahvaljujući rezonantom kretanju sa Neptunom. Do sličnog zaključka je došlo više autora (Ida et al. 2000, Kobayashi & Ida 2001, Quillen et al. 2004). To nam govori da nam je potrebno povećanje ovih elemenata u doba ranog Sunčevog sistema, prilikom formiranja objekata, jer su tada perturbacije i uticaji bili najčešći i najjači, dovoljne snage i za veće promene orbita. To se podudara sa idejom bliskog prolaska, i po vremenu odigravanja, ali i po jačini uticaja na disk. Raspodele objekata u pojasu sa Slike 2. favorizuju objekte sa manjim inklinacijama i objekte na manjim rastojanjima od Sunca što je posledica načina pretrage neba za objektima u Kajperovom pojasu. Tj. višestruko su favorizovani objekti sa manjim inklinacijama, jer gotovo sve potrage za dalekim telima Kajperovog pojasa se fokusiraju na oblasti u blizini ekliptike, tamo gde tela sa većom inklinacijom provode daleko manje vremena. Isto tako objekti na većim rastojanjima su teži za detekciju, i teže se otkrivaju u odnosu na objekte na manjim rastojanjima od Sunca. 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 u Kajperovom pojusu.

U unutrašnjem delu planetezimalnog diska (30-40 AJ) usled bliskog prolaska vrednosti ekscentriciteta i inklinacije se samo neznantno povećaju. Ekscentriciteti orbita planetezimala su ispod 0.25. U ovom delu diska, u vremenu posle formiranja Kajperovog pojasa, migracijom Neptuna (Malhotra 1995) se formira rezonantna grupa objekata, a uslov da objekat bude zahvaćen u rezonantno kretanje sa Neptunom jeste da ima mali ekscentricitet. Na osnovu toga, da bi uopšte bilo moguće stvaranje rezonantnih objekata, bliski prolazak ne sme da poveća ekscentriticete iznad ≈ 0.2 objektima u disku koji su na manjim rastojanjima od Sunca (Malhotra et al. 2000). Ovo je u potpunosti u skladu sa rezultatima izvršenih simulacija.

Nastanak ivice klasičnog dela Kajperovog pojasa zahteva veoma snažan proces koji će dovoljno jako delovati na deo planetezimalnog diska u okolini današnje granice, a na manjim rastojanjima delovati silom koja neće izazvati velike promene orbita objekata da se ne bi razorio ceo disk. Pertubacije dovoljno jake da 'odseku' protoplanetarni disk na ≈ 50 AJ mogu da se objasne direktnim bliskim prolaskom zvezde, i to prolaskom sa manjom udaljenošću pericentra (prolasci simulacije grupe 1). Kako posmatramo objekte od unutrašnje granice simuliranog diska pa ka objektima sa većim rastojanjima od Sunca, promene postaju sve veće i veće i pojas je sve ekselovaniji sve do regiona gde se većina objekata izbací 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, stoga ovaj mehanizam dodatno smanjuje udaljenost granice pojasa. Visoka srednja vrednost ekscentriciteta dovodi do velike disperzije brzine u spoljnem delu diska koja uzrokuje da sudari među objektima postanu jači (Ohtsuki et al. 1993). Ovo dovodi do remecenja akrecije planetezimala (što zavisi od tajminga samog prolaska zvezde) 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 AJ 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. Stoga možemo zaključiti da bliski zvezdani prolazak može biti odgovoran za nastanak jasne spoljne ivice klasičnog dela Kajperovog pojasa, a da na tačan požaj granice imaju ključnu ulogu kasniji uticaji od strane velikih planeta. Prolasci iz 2. grupe simulacije takođe mogu da naprave spoljnju ivicu diska, na različitoj udaljenosti od početne granice diska (Slika 11). postoji određena udaljenost pericentra od Sunca pri susretu zvezda koja je potrebna da bi nastala ivica diska (u našem slučaju granica na oko 50 AJ; tu naravno figuriše i masa perturbujuće zvezde), i ona je za sekundarnu zvezdu mase jednake Sunčevoj je na oko između 100 i 200 AJ od Sunca. Ipak, ovako oštra granica kao sadašnja može da nastane samo zajedničkim delovanjem više činilaca od kojih bi prvi i najvažniji bio bliski prolazak zvezde pored Sunca u vreme formiranja pojasa.

Postojeći modeli formiranja Kajperovog pojasa pokazuju da bi prvobitni disk u kojem su posmatrani objekti nastali trebalo da sadrži $\sim 10 M_z$ (M_z – masa Zemlje) materijala, ali trenutno u regionu Kajperovog pojasa ima samo $\sim 0.1 M_z$ (Trujillo & Brown 2001). Jedan od mogućih mehanizama smanjivanja mase jeste svakako blizak zvezdani prolazak. Zvezdanim prolaskom se u pojusu izbacuje deo mase diska putem više efekata. Prvo, direktnim izbacivanjem hiperboličnom putanjom usled snažnog gravitacionog uticaja zvezde i potom mogućim zarobljavanjem čestica u orbitu oko zvezde koja prolazi, može da se izbaci 5-50% planetezimala iz diska. Drugo, blizak prolazak povećava i disperziju brzina, pa se zbog intenzivnih sudara među planetezimala stvore velike količine prašine koja se izbaci iz pojasa (Stern 1995) usled pritiska zračenja, Sunčevog vetra i Pointing-Robertson efekta. I na kraju, u smanjivanju mase diska deluje i Neptun koji izbacuje objekte sa velikim ekscentricitetima. Neptun u smanjivanju mase učestvuje bez obzira na bliski prolazak. Međutim, ovaj mehanizam je 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 protoplanetarnog diska. Samim izbacivanjem objekata iz dela planetezimalnog diska bližem Suncu se vremenom polako stvara i Ortov oblak kometskih objekata. Potrebno da objekti koji su i dalje pod uticajem velikih planeta, vremenom dobiju jako izdužene eliptične putanje sa što većim ekscentricitetima i što udaljenijem afelom, da bi došli do udaljenosti gde spoljni uticaji mogu da promene ponovo putanju objekta, povećaju perihel i tako zarobe objekat u Ortovom oblaku. Procenjuje se da je moguće smanjiti masu planetezimalnog diska za preko 50% zvezdanim prolaskom (Malhotra et al. 2000) što je u skladu sa rezultatima ovih simulacija. Ukupan procenat objekata koji je ostao iz vremena planetezimalnog diska je manje od 2-5%. Isto važi i za broj objekata u Ortovom oblaku, gde je procenat od početnog diska još manji zbog male efikasnosti mehanizma izmeštanja objekata u oblak.

Pitanje s kojim se moramo ozbiljnije pozabaviti jeste i da li je efekat bliskog prolaska na prošireni rasejani disk i Ortov oblak konzistentan sa trenutno prepostavljenim karakteristikama ovih struktura.

Blizak zvezdani prolazak bi mogao objasniti prilično “ekstremne” orbite nekih tela u tzv. proširenom rasejanom pojusu. 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. I dalje nisu na dovoljnim udaljenostima da spoljni gravitacioni uticaji nadvladaju uticaj planeta i Sunca, stoga se ne zna šta im je otrglo perihele od uticaja Neptuna, jer se prepostavlja da ako su nastali u akrecionom disku nekada morali imati drugačije putanje. Objekti u spiralnoj strukturi diska koja nastane posle simulacije (simulacije grupe 1), a i neki objekti van spiralnih struktura (simulacije grupe 2) imaju veoma slične orbitalne elemente sa objektima u proširenom rasejanom disku (Slika 13), tako da su orbite tih udaljenih objekata mogле nastati uticajem zvezde koja prođe pored planetezimalnog diska i na taj način im poveća perihele i udalji od Neptunovog uticaja. Bliski prolazak zvezde je za sada najelegantniji način da se reši problem putanja objekata proširenog rasejanog pojasa.

Kometi u Ortovom oblaku su gravitaciono slabo vezane za Sunce, tako da bi i najmanje gravitacione perturbacije imale velike efekte na sam oblak. U simuliranim geometrijama prolazaka, Sunce usred interakcije sa drugom zvezdom promeni svoju brzinu i do ~ 5 km/s (Levison et al. 2004). Ova vrednost je zaista velika kada se upoređi sa prosečnom brzinom komete u današnjem Ortovom oblaku koja iznosi ~ 0.2 km/s. Sama promena brzina kometa bi bila manja od promene Sunčeve brzine, jer bi one uglavnom bile dosta udaljenije od sekundarne zvezde nego samo Sunce. Ako bi Sunce promenilo svoju brzinu za vrednost osetno veću od brzine komete, tada bi Ortov oblak bio prosto otregnut od Sunca. Sunce bi dobilo ubrzanje u jednom smeru, a većina kometa bi nastavila da se kreće po starim putanjama. A kako bi promena brzine Sunca bila veća od kosmičke brzine za komete, Sunce ne bi moglo da odvuče oblak kometa sa sobom. Međutim, u vreme prepostavljenih bliskih prolazaka koji se simuliraju, Ortov oblak još nije postojao. Prema novijim modelima (Dones et al. 2004) Ortov oblak je rastao polako i u etapama, ukupno formirajući se za oko 10^9 godina. U početku se svi objekti nalaze u protoplanetarnom disku (krajnja granica diska u simuliranom sistemu je na 500 AJ). Kada se formiraju, velike planete počinju vremenom da izbacuju objekte na veće udaljenosti od Sunca, povećavajući im veliku poluosu orbite. Ovo se najčešće dešavalо u zoni Jupitera i Saturna, ali i Urana i Neptuna. Ali velike planete Sunčevog sistema ne mogu da objektima izbacе i tačku perihela, koja ostaje u njihovoj zoni. Time objekti dugo ostaju pod uticajem planeta, a njihove velike poluosе se menjaju na slučajan način. Ako objekat dosegne udaljenosti od više hiljada astronomskih jedinica od Sunca, gravitacioni uticaji Galaksije dolaze do izražaja. Oni deluju kao plimske sile, pa se udaljenost perihela može pomeriti, dok velika poluosa približno ostaje ista (Weissman 1998b). Na ovaj način se stvarao Ortov oblak. Zvezdani prolazak koji simuliramo se dogodio pre ovog procesa, čak i pre formiranja velikih planeta. Treba odgovoriti kakav uticaj bi zvezdani susret mogao da ima na budući proces formiranja oblaka kometa.

Posle simulacija grupe 2, veliki broj objekata sa početnim velikim poluosama $a > 200$ AJ dobija perihele koji ne dolaze do buduće zone planeta, odnosno udaljenosti perihela najčešće ostaju $q > 50$ AJ. Ovo naizgled, znači da ti objekti ne mogu kasnije da učestvuju u formiranju Ortovog oblaka, jer bi bili van domaćaja planeta i njihove orbite ne bi mogле toliko da se menjaju. Za sada nemamo indikacija o veličine populacije u proširenom rasejanom disku (pošto bi uglavnom takvi objekti opstali u tom regionu i do danas). Sadašnje pretrage neba imaju problema u detekciji objekta sa $q > 50$ AJ (Allen et al 2002) tako da ne možemo sa sigurnošću znati o kakvoj se populaciji radi. Ipak, sa prepostavkom da broj takvih objekata ne prevaziđa broj asteroida u „običnom“ rasejanom disku (na kojeg Neptun ima uticaja) možemo izvući zaključak da nam je potreban zvezdani prolazak sa manjim rastojanjem pericentra, tako da što veći broj objekata može doći pod uticaj Neptuna. Kada objekat dospe u zonu uticaja Neptuna, pitanje je jedino da li će mu sam Neptun menjati putanju, ili će ga samo „proslediti“ ostalim velikim planetama. A zvezdani prolazak treba da je takav da planetezimali sa periferije

protoplanetarnog diska ulaze u region velikih planeta kada im se promeni orbita prilikom zvezdanog prolaska. Time bi kasnijom dinamičkom evolucijom mogli dobili određen broj planetezimala u proširenom rasejanom disku i kometskom oblaku. Za ovaj uslov potreban je zvezdani prolazak sa manjim pericentrom, približno $q < 250$ AJ, da bi veći broj objekata se približio velikim planetama. Sa obzirom na to da je granica protoplanetarnog diska na 500 AJ, ili nešto dalje, a to je u skladu i sa uslovom pericentra za nastanak ivice diska, ivice klasičnog pojasa. Objekti koji posle prolaska imaju pericentre do 31 AJ dolaze pod direktni uticaj Neptuna (odmah, ili nešto kasnije kako Neptun polako migrira od Sunca), i ti objekti imaju veće šanse da budu poslati ka drugim velikim planetama (zbog te promene orbitalne energije Neptun i migrira; recimo oko 30% objekata sa prvobitnim $30 < q < 32$ AJ završi pod Jupiterovim dejstvom (Levison and Duncan 1997)). Objašnjenje takvog dešavanja je da objekti koji imaju perihele blizu Neptuna, ali ne seku njegovu putanju teško mogu da pređu tu dinamičku barijeru, već im uglavnom Neptun da dodatnu orbitalnu energiju i poveća im rastojanje afela. Nasprot njima, objekti koji preseku Neptunovu orbitu uglavnom daju određenu energiju Neptunu i perihel stare orbite im postane afel nove orbite, a s tim im se smanji velika poluosa i premeste se u region gasovitih planeta. Ta tela verovatnije čeka sudbina da budu izbačeni iz planetarnog regiona, ali i da sa velikom energijom da samo prolete kroz Ortov oblak i izlete iz samog Sunčevog sistema u međuzvezdani prostor. Ipak, objekti čiji periheli su u rasponu od približno $31 < q < 36$ AJ nisu odmah pod direktnim uticajem Neptuna, ali im je dinamička sudbina najčešće vezana za ovu veliku planetu. Naime, usled zajedničkog efekta Kozai rezonance (najviše deluje na udaljenost perihela), orbitalne rezonance (koja najčešće stabilizuje putanju) i haotičnog *random-walk* kretanja orbite takva tela završe u dinamičkom uticaju Neptuna, međutim za to im je potrebno značajno više vremena (Fernandez et al 2004), reda veličine i više stotina miliona godina. Čak i objekti sa većim rastojanjima perihela imaju šansu da dospeju pod uticaj Neptuna, ali za njih za takav scenario je u proseku potrebno više vremena, i sa približno $q > 36$ AJ je potrebno vreme koje duže od starosti samog Sunčevog sistema. Po Fernandez et al (2004) 50% objekata iz rasejanog diska završi u Ortovom oblaku, tj. dospeju na približno 20000 AJ preko povećanja afela dejstvom Neptuna, i kad dospeju na toliko veliko rastojanje tad na njih galaktički uticaj ima preovladujuće dejstvo (i tada se rastojanje perihela povećava; v. Popunjavanje Ortovog oblaka) i oni postaju sastavni deo Ortovog oblaka. Ako su objekti iz rasejanog diska u nekoj rezonantnoj orbiti sa Neptunom (što je dosta čest slučaj zbog velikog broja rezonantnih orbita u koje se mogu uhvatiti objekti), preko rezonance oni mogu da ostanu jako dugo dinamički stabilni sa malim promenama orbite. I tad telu treba i do par milijardi godina (dok ne izade iz rezonance) da dospe do Ortovog oblaka, ali je taj put poprilično efikasan sa stanovišta koliki procenat objekata postane kometa u oblaku, u odnosu na objekte koji se totalno izbace iz sistema. Za ovaj mehanizam tela moraju da budu pod uticajem gasovitih planeta, odnosno najviše Neptuna. Razlog je što objekti sa udaljenostima perihela $25 < q < 36$ AJ (donja granica je 25 AJ, jer se Neptun formirao na udaljenosti od Sunca manjoj nego što je danas) ubedljivo najviše dospeju do oblaka, tj. čak 60% svih objekata koji dospeju do Ortovog oblaka su krenuli iz planetarnog regiona sa ovim perihelima (Fernandez et al 2004). Tela sa manjim q uglavnom bivaju izbačena potpuno iz sistema, jer dospeju u zonu uticaja Jupitera, ili manji procenat završi u unutrašnjem delu sistema. Jako malo broj objekata, ako se uopšte to i desi, sa $q > 36$ AJ dospeju do Ortovog oblaka (Holman & Wisdom 1993), jer imaju mnogo stabilnije orbite (nemaju izraženog perturbera). Tako da objekti iz proširenog rasejanog diska ne menjaju svoje orbite značajnije tokom dinamičke evolucije koja traje milijardama godina.

Zvezdani prolazak pomaže transfer ka Ortovom oblaku. Iz Tabele 5. uočavamo da u simulacijama grupe 1. čak polovina tela iz pojasa od 35-70 AJ dobije takve orbite da dospe pod uticaj Neptuna, a bez samog dejstva sekundarne zvezde ti objekti bi ostali na orbitama koje su dinamički stabilne u periodu reda veličine 10^9 godina i dužim. Masa koja se procenjuje da je postojala u pojusu na 35 - 50 AJ je $10 - 35 M_{\oplus}$ (Stern & Coldwell 1997), čime ovaj efekat dobija izuzetan značaj. Time bliski zvezdani prolazak postaje najdominantnji mehanizam izbacivanja tela u Ortov oblak. Ovakav rezultat daju samo direktni i vertikalni prolasci, nevezano za samu inklinaciju, s tim da retrogradni prolasci nemaju ovakvo dejstvo na objekte i oko 10 puta su manje efikasni. Prolasci sa većim rastojanjima perihela bi imali manji uticaj i procenat tela koja dodu pod dejstvo Neptuna bi se smanjilo, tako da pericentar prolaska bi trebao da bude manji od ≈ 250 AJ. Na tela koja su malo udaljenija, tj. na objekte iz simulacija grupe 2. oko pola procenata objekata se približi Neptunu na rastojanja koja favorizuju premeštanje tela u kometski oblak. Taj procenat nije velik, kao ni verovatno ukupna masa na tim većim rastojanjima od Sunca koja je bila na raspolaganju za formiranje tih objekata. Ukupna masa tih objekata je bila značajno manja od mase na, recimo, rastojanju Neptuna ili Kajperovog diska, pa time ni ovaj efekat verovatno nije toliko značajan za samo popunjavanje kometskih objekata u oblak. Ipak, treba imati na umu da bez zvezdanog prolaska ovi objekti ne mogu ni da dođu do planetarnog dela sistema i potom budu premešteni u Ortov oblak. Objekti iz celog početnog diska u ovim simulacijama, gotovo ravnomerno (i oni sa većim i oni sa manjim velikim poluosama) imaju šanse da završe pod uticajem Neptuna (Slika 18).

Ipak, planetezimali u regionu udaljenjem od velikih planeta (objekti takođe u simulacijama grupe 2.) imaju još jedan način da dospeju do Ortovog oblaka. Zvezdani prolazak, pored toga što te objekte može priližiti planetarnom regionu, može i da preuzeme ulogu velikih planeta i da sam izbaci objekte do udaljenosti dovoljno velikih da ti objekti postanu komete u oblaku. Objekti koji imaju imaju pericentre na $q > 50$ AJ mogu da dospeju do Ortovog oblaka pod uslovom da im zvezdani prolazak dovoljno promeni orbitu da oni, kada su u afelu, dospeju do velikih udaljenosti od Sunca tako da im uticaj galaktičke okoline i same Galaksije može menjati putanje i povećavati perihele. Kod raznih autora uglavnom se spekulise da ako objekti dospeju do približno 20000 AJ, na njih mogu značajno da deluju sile Galaksije i bliskog galaktičkog okruženja (Fernandez et al 2004, Levison et al 2004, Stern & Weissman 2001). U Tabeli 6. vidimo da se direktnim prolaskom izbaci oko 2% objekata na udaljenosti veće od 20.000 AJ. Retrogradni prolazak je za red veličine manje efikasnosti, iako oba prolaska stvaraju izrazite spiralne krakove, ovaj proces nije u vezi sa razvojem kraka; barem ne kod retrogradnog prolaska. Kraci dostižu velike udaljenosti od Sunca, međutim kada zvezda ima retrogradni smer, iako se krak razvije dovoljno, ne sadrži tela sa eliptičnim orbitama, nego uglavnom objekti imaju hiperbolične putanje i orbitalnu energiju takvu da se ne zadržavaju u Sunčevom sistemu (Slika 21). Tako da je u ovom slučaju krak samo kratkotrajna formacija.

Zvezdani prolazak preko nabrojanih efekata postaje najdominantniji mehanizam za popunjavanje Ortovog oblaka. Bez zvezdanog prolaska, recimo, Dones et al (2000), Duncan et al (1987), Bailey & Stagg (1988) daju da je efikasnost prenosa objekata u Ortov oblak oko 3-10% prvobitnog materijala koji se nalazio u protoplanetarnom disku u oblastima odakle se tela izbacuju u Ortov oblak. U delu diska gde se formirao Neptun i za koji se veruje da je jedan od najvećih izvora budućih kometa procenjuje da je početna masa bila oko $30 M_{\oplus}$. Od te početne mase manje od pola je stvorilo planetu Neptun, a iz simulacija znamo da je ovom delu diska efikasnost izbacivanja objekata u Ortov oblak 7%, to nam daje ukupnu masu od $1.5 M_{\oplus}$. Dodatni izvori, kao što je između ostalog recimo i uticaj rezonantnih orbita u kasnjem Kajperovom

pojasu kao i uticaj ostalih planeta u izbacivanju materijala ostao od planetnog formiranja koji se bio našao u okolini njihovih orbita, mogu da daju ukupnu masu oblaka oko $3.5 M_{\odot}$ (Stern, Weissman 2001). To je ipak mala vrednost u odnosu na trenutne procene mase celog oblaka (Stern, Weissman 2001). Dodatni ekscentrator orbita bi mogao da bude zvezdani prolazak čime bi se procenti efikasnosti prenosa u oblak značajno povećali. Bliski prolazak bi povećao objektima ekscentritete i time povećao i broj objekata koji su izbačeni u oblak iz drugih delova sistema gde je prenos objekata u oblak značajno neefikasniji. Takođe bi pospešio i procenat prenosa iz oblasti bližih Neptunu gde bi veći broj objekata upao pod dejstvo Neptuna i drugih velikih planeta.

Objekti koji promene sistem, odnosno koje zarobi sekundarna zvezda, uglavnom dospeju na rastojanja gde su izvan domašaja planeta u novom sistemu (ako posmatramo objekte koje bi zarobilo Sunce, gde znamo rastojanja planeta od matične zvezde). Jedino objekti sa gotovo paraboličnim orbitama mogu da dospeju do planeta, ali ipak veći broj završi na orbitama koje mogu dinamički biti stabilne, bez jakog uticaja planeta i Galaksije. Ti kometski objekti bi mogli da učestvuju u popunjavanju Ortovog oblaka, ali su veći izgledi da ostanu u proširenom rasejanom disku. Orbite zarobljenih objekata bi možda bile drugačije ako bi se radilo o zvezdanom prolasku sa drugačijim karakteristikama. Za to je potreban detaljniji pristup problemu.

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 kraće vreme delovanja zvezde za koje može da perturbuje orbitu objekta, a samim time i 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 ili su pri njima jače izražene, baš zbog vremena za koje perturbator ima veliki uticaj na objekte.

Strukture u prostornoj raspodeli u pojasu koje nastanu usled uticaja bliskog prolaska su veoma izražene neposredno nakon prolaza, ali se ne očuvaju tokom dalje evolucije orbita u pojasu. Disocijacija ovih oblika se dešava usled spoljnih uticaja jata i galaksije, ali i zbog međusobnog delovanja među planetezimalima. Razilaženje planetezimala iz spirale oko diska (onih planetezimala koji su ostali vezani za Sunce) se uočava već nakon ~ 10 orbitalnih perioda usled fazne razlike orbita objekata u spirali (Kalas et al. 2000). Kasnije na prostornu strukturu najznačajniju ulogu ima uticaj velikih planeta, pogotovo za vreme migracije gasovitih planeta Sunčevog sistema.

Karakteristične raspodele longitude uzlaznog čvora i argumenta perihela nastale prilikom bliskog prolaska nisu konzistentne sa trenutnim posmatranjima u Kajperovom pojasu, a ni u spoljnem Ortovom oblaku (na osnovu podataka novih kometa koje dođu iz ovih najudaljenijih delova Sunčevog sistema) što se i očekuje zbog najvećeg uticaja Galaksije na tu oblast. Iako uticaj Galaksije izdužuje Ortov oblak u pravcu centra Galaksije (v. Uticaji na oblak), taj uticaj je mali da dođe do favorizovanja kometa da više dolaze iz određenih delova oblaka. Neočuvanje longitude uzlaznog čvora i argumenta perihela raspodele 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 kod za objekte u Kajperovom pojasu (Malhotra et al. 2000).

Po raspodeli orbitalnih elemenata znamo da Ortov oblak ima sferoidan oblik, za razliku od planetnog sistema i Kajperovog pojasa koji su oblika diska. Netpun može da menja objektima inklinacije, najčešće preko dugotrajnog dejstva u orbitalnoj rezonanci. Ipak, za sferoidan oblik oblaka potrebni su drugi procesi. Uticaj galaksije dovodi do dugotrajne randomizacije orbitalnih parametara, ali zvezdani prolasci imaju krucijalnu ulogu u formiranju oblika oblaka (Fernandez & Ip 1981). Bliski zvezdani prolazak može da ima važnu ulogu u početnom povećanju inklinacija objektima što dovodi do homogenizacije oblaka. Na Slici 22 se vidi kako direktni prolazak inklinacije 30° povećava objektima inklinacije i gotovo ravnomerno (ako se gledaju inklinacije i longitude) ih izbacuje na velike udaljenosti.

Neki od tih objekata imaju hiperbolične putanje i izbace se van sistema tako da postanu galaktičke komete. U prolazima druge grupe simulacija velik broj planetezimala se izbaci na ovaj način (Tabela 5). Procenjuje se da se prilikom formiranja oblaka izgubi i do 99% materijala (Meinke et al 2000). Iako postoje procene da je ovaj broj manji (Weissman 1994) i dalje se ogroman broj objekata izbaci van sistema, što su pokazale i ove simulacije. Ove galaktičke komete se nalaze prvo u prvobitnom Sunčevom zvezdanom jatu, a potom i u međuzvezdanom postoru kada se jato dezintegriše. Kako su u jatu zvezdani prolasci česti, veliki broj kometa se nalazi u jatu nevezane za neku zvezdu. Potrebno bi bilo izvršiti simulaciju da se vidi koliko takvih kometa može da bude uhvaćeno u sistem. U trenutnom galaktičkom okruženju kada se uzme procena za koncentraciju galaktičkih kometa od $\sim 10^{13} \text{ pc}^{-3}$ (Sekanina 1976) i činjenice da od planeta samo Jupiter može da zarobi te objekte (Torbett 1986), dolazi se do rezultata da u se prosek u Sunčevom sistemu jedna galaktička kometa u periodu od 60 miliona godina (Torbett 1986).

Ipak, pored galaktičkih kometa Sunce može da zarobi komete nastalih oko drugih zvezda preko direktnog zarobljavanja objekata prilikom bliskog prolaska, kada jedna zvezda od druge zvezde otrgne određen broj objekata koji posle ostanu da kruže u novom sistemu. U tabeli 4 je predstavljen broj zvezda koje na ovaj način mogu da završe u Sunčevom sistemu. Ovakve komete, koje su nastale u drugim protoplanetarnim diskovima, mogle bi da imaju nešto drugačije sastave od kometa nastalih u solarnom protoplanetarnom disku (i same te komete imaju različite sastave u zavisnosti od mesta nastanka u disku) što može da doprinese većem diverzitetu populacije kometa.

Po trenutnoj statistici preko 60% kratko-periodičnih kometa ima $q < 1 \text{ AU}$ (Weissman 1998b), što znači da od tih kometa neke mogu da se približe putanji Zemlje, ako ne i da je preseku. Na hipotezu da je voda na Zemlji došla sa kometa (gde postoje problemi oko HDO/H₂O odnosa u vodi na kometama i u okeanima) može da utiče i bliski zvezdani prolazak. Odnos D/H čuva informaciju o prvobitnim uslovima u kojima komete nastaju (Villanueva 2008), tako da na osnovu ovog odnosa možemo saznati i o sastavima delova diska gde su se komete formirale. Tokom simulacija pažnja je posvećena mogućnošći da zvezdani prolasci donesu vodu sa objekata koji imaju drugačije D/H odnose nego od kometa koje su do sad proučavane. Prvi objekti izvan planetarnog diska, koji ne dolaze do planetarnog regiona, sa dinamički stabilnim orbitama u periodima od milijardi godina mogu pomoći bliskog prolaska da dospeju do unutrašnjeg planetarnog regiona blizu Zemljine putanje. Nepoznat je sastav takvih objekata, ali je sigurno da ti objekti bez ovakvo jednog snažnog događaja ne mogu da dospeju do planeta.

Do sada je poznat D/H odnos za vodu sa 4 komete (Halejevu (Eberhardt et al 1995), Hjaku take (Bockelee-Morvan et al 1998), Hejl-Bop (Meier et al 1998) i 8P/Tuttle (Villanueva 2009)) i sve imaju oko 2 puta veću vrednost od vode na Zemlji. Isto je poznato da hemijski sastavi kometa mogu značajno da se razlikuju, čak i ako su komete u istoj dinamičkoj klasi (Mumma et al. 2008) što govori o mešanju objekata nastalih na različitim lokacijama. Rezultati za odnos D/H za druge komete, koje očekujemo da se izmere, ako se budu razlikovali od trenutnih mogu da daju otisak jačeg mešanja objekata u prošlosti, čak i između različitih planetarnih diskova što se dešava prilikom bliskog prolaska.

Bliski zvezdani prolazak značajno poveća broj objekata koji priđu Zemljinoj putanji. U koplanarnim prolascima, oko pola procента prvobitnog diska završi na rastojanjima unutar Zemljine orbite. Ovakav priliv kometa može da doneše veliku količinu materijala (između ostalog i vode) na planetu Zemlju. Procene za povećan broj kometa koje dolaze u unutrašnjost Zemljine orbite za ne tako bliski prolazak govore da bi takav priliv trajao par miliona godina (Weissman 1998b). Simulacije grupe 2 pokazuju da samo koplanarni prolasci objektima promene putanje tako da jedan deo njih dospe na udaljenosti manjim od 1 AJ. Direktan prolazak inklinacije 30° je objekte približio samo velikim planetama, ali ne i unutrašnjim. Izgleda da se uticaj prolaska (sa nenultom inklinacijom) preraspodeli i na vertikalno pomeranje čestica, i da deo sile (koja je kod koplanarnog prolaska stalno u jednoj ravni) objektima menja inklinacije i na taj način smanjuje za određenu vrednost uticaj na perihel. Razlika između koplanarnih prolazaka je da objekti koji priđu sistemu do Zemlje preko direktnog koplanarnog prolaska zvezde su objekti koji ostanu u glavnom delu diska i posle prolaska (tj. njihove velike poluose ostaju na udaljenostima prvobitnog diska čestica). Dok kod retrogradnog koplanarnog prolaska čak i neki objekti iz spirale mogu da imaju takve perihele da prilaze orbiti Zemlje, a takvi objekti su izuzetno dinamički nestabilni i imaju izuzetno velike periode revolucije (preko milion godina za rastojanja od Sunca preko 20.000 AJ) što znači da je moguće da ti objekti ni ne dospeju do unutrašnjosti Sunčevog sistema. Jedan deo objekata sa kvaziparaboličnim putanjama posle retrogradnog prolaska ima obrnuti, odnosno retrogradni smer kretanja. Isto tako i (blaga) većina novih kometa koja priđu Sunčevom sistemu imaju retrogradne orbite (Fernandez 1981), s tim što na komete glavnu ulogu imaju efekti galaktičke sredine koji vrše randomizaciju određenih orbitalnih parametara kometa u oblaku.

Objekti koji uđu u planetarni sistem mogu da završe i kao asteroidi u glavnom asteroidnom pojasu (Weissman et al 2002) gde dobiju orbitu koja može (i posle velikog broja revolucija) da se približi orbiti planete Zemlje. Zvezdani prolazak svakako pomaže tranziciju objekata u asteroidni pojas i na taj način između ostalog dopunjava NEA objekte koji nisu dinamički stabilni, a i time povećava šansu da neki kometski objekat dospe do Zemlje. Nepoznato je da li je moguće da se D/H odnos promeni prilikom te tranzicije objekta u glavni asteroidni pojas.

Bliski zvezdani prolasci deluju i na planete u planetarnom sistemu, tačnije na njihovo formiranje. Prolazak koji je ovde simuliran se desi za vreme formiranja velikih planeta. Posle prolaska ostaje dovoljno materijala da one mogu da završe svoje formiranje. Isto tako zbog svoje velike mase, uticaj na njihove umereniji nego na objekte sa manjom masom. Međutim, previše blizak prolazak ne sme da se desi previše kasno, jer postoji mogućnost da se neka od planeta čak i izbaci iz sistema (Mamberg et al 2007). Međutim, velike planete su od svog formiranje pretrpele značajne pozicione promene od svog nastanka, tu se pre svega misli na migraciju migracija. Čak je moguće da su Uran i Neptun tokom svoje dinamičke evolucije zamenile mesta i redosled u

sistemu (Thommes et al 2002), što govori da su velike planete sposobne i za amortuzaciju većih perturbacija, kao što je bliski zvezdani prolazak.

U slučaju da 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. Količina izbačenog materijala iz sistema bi bila veća, a verovatno najveći uticaj bi vešestruki prolasci imali na formiranje Ortovog oblaka, jer veliki broj objekata koji su perturbovani u sistemu i izbačeni na velika rastojanja, naknadnim prolascima zasigurno bi bili izbačeni iz sistema, a svakim narednim prolaskom bi broj objekata koji bi dospeli na pogodne putanje za popunjavanje Ortovog oblaka bio redukovana, zbog već smanjene mase provobitnog diska čestica. Ipak, za detaljnije zaključke bi bila potrebna simulacija višestrukog prolaska.

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 2003). Spiralni oblik diska oko zvezde HD 100546 je verovatno nastao bliskim prolaskom pericentra na oko 500 AJ (Grady et al. 2001). Larwood & Kalas (2001) su ukazali da je asimetrija i prstenasta struktura protoplanetarnog diska oko zvezde Beta Pictoris prouzrokovana bliskim zvezdanim prolaskom, što je potvrđeno i numeričkim simulacijama kojima je pokazano da ovakve strukture nastaju u spoljnjim 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

Za uticaj bliskog zvezdanog prolaska na Kajperov pojas, možemo sa sigurnošću utvrditi koliko bi on mogao da bude odgovoran za sadašnju strukturu, ali i dinamiku pojasa. Bliski susreti Sunca sa drugim zvezdama su se nesumnjivo dešavali u prošlosti (i dešavaće se i u budućnosti) (Garcia-Sanchez 2001). Ipak, ne može se utvrditi da li se ovakav bliski susret kakav je simuliran zaista dogodio u prošlosti Sunčevog sistema, jer dugotrajna evolucija pojasa od 4 milijarde godine i kompleksni procesi koji su oblikovali sam pojas tokom ovog celog perioda može lako da ublaži posledice jednog procesa kao što je bliski prolazak, ma koliko on bio intezivan i silovit, a može i da stvori pojave koje imaju zaista različite uzročnike a slične posledice. Međutim, činjenica je da ne postoje pojave koje se javljaju prilikom ovakvih susreta zvezda, a da su u protivrečnosti sa stanjem Kajperovog pojasa u ovom vremenu, i da samo jedan proces kao što je bliski susret zvezda može da objasni nastanak čitavog niza pojava i karakteristika koje sada zapažamo u pojusu. Samim tim simulacija bliskog prolaska daje nagoveštaj da je to jedan od važnijih procesa koji su oblikovali sadašnjost Sunčevog sistema.

Dobro poznavanje objekata Kajperovog pojasa nam je omogućilo detaljnu analizu uticaja na pojus (s tim da takav uticaj ostane popudaran sa karakteristikama pojusa) i shvatanje o

verovatnosti da se dogodio proces kao što je bliski susret. Kod Ortovog oblaka postoji slabije poznavanje činjenica o dinamici i istoriji oblaka, kao i samih objekata na najvećim udaljenostima u Sunčevom sistemu. Dosadašnje pretpostavke moguće su da se suoče sa malim brojem posmatračkih nalaza o objektima, a i strukturi i dinamici celog oblaka. Ipak, iako bliski susret nije mogao da prođe kroz potpuno detaljni test o podudarnosti karakteristika oblaka i pojave koje se stvara perturbator, dobijeni su rezultati koji su najbitniji sa stanovišta formiranja i nastanka oblaka, i uticaja bliskog zvezdanog prolaska na taj proces. Rezultati simulacija govore da prolazak nesumnjivo pomaže sam transfer objekata na granici planetarnog sistema ka ortovom oblaku, što direktno svojim uticajem tokom prolaska, što indirektno preko menjanja putanja objekata tako da dolaze pod uticaj velikih planeta, naročito Neptuna. I mogao da bude najbitniji proces koji može da izazove velike dinamičke promene u spoljnem delu protoplanetarnog diska i prouzrokuje veća pomeranja mase unutar sistema, tako da Ortov oblak postane masivan koliko se danas procenjuje.

Sa druge strane uticaj bliskog prolaska na okolinu Zemljine orbite nije potpuno jasan. Simulacije pokazuju da se prolaskom u blizini Zemljine orbite može naći nezanemarljiv procenat objekata. S tim što je ostalo nejasno koliko bliski prolazak povećava broj sudara Zemlje sa kometskim objektima, i za koji vremenski period. Pošto se bliski prolazak se dešava dok se planeta Zemlja formira, pretpostavlja se da se povećani priliv kometskih objekata ne može dovoljno produžiti da se planeta Zemlja dovoljno ohladi da bi gasoviti materijal (prvenstveno voda) koje kometski objekti donesu mogao deponovati na njoj, bez ponovnog izbacivanja u međuplanetarni prostor. Za tako nešto je ipak potrebno da se velike planete potpuno formiraju i da posle one same prouzrokuju povećani priliv kometa ka unutrašnjosti sistema (što je u literaturi pozato kao *Late Heavy Bombardment*), s tim što bi orbite objekata posle prolaska moguće biti takve da favorišuju ovaj proces, kao i proces transfera objekata iz sponjeg u glavni asteroini pojas. Ali za precizniji zaključak bi bilo potrebno detaljnije istraživanje na ovu temu.

Bliski prolazak predstavlja događaj koji pomaže i koji možda može i da reši određena pitanja koja se javljaju u proučavanju formiranja Sunčevog sistema kakav je danas. Zvezda koja prođe blizu Sunca ima veliki uticaj na objekte koji formiraju Kajperov pojas i Ortov oblak. Uticaj je prilično konzistentan sa trenutnim osobinama Kajperovog pojasa, bez posledica prolaska koja su protivrečna sa trenutnim stanjem. Kod Ortovog oblaka je poznato manje podataka, ali takođe prolazak se pokazuje kao proces koji može da bude najznačajniji u transferu objekata ka oblaku. Za uticaj i na Kajperov i na Ortov oblak prolazak bi trebao da bude direkstan, sa nenultom inklinacijom koja ne prelazi oko 15° . Takođe direkstan prolazak najviše pospešuje i približavanje objekata u unutrašnji sistem u okolini orbite Zemlje, ali nije jasan uticaj na sadašnje karakteristike naše planete (sa akcentom na vodu u okeanima), zbog samog tajminga prolaska koji mora da se desi dok se planeta Zemlja još nije potpuno formirala. Isto tajming prolaska, i za spoljne strukture mora da se poklopi; mora da se desi tek pošto se stvori veliki broj planetezimala i ne omete akreciju, ali ne sme da se desi previše kasno da omete strukture koje su se već stvorile ili se tek stvaraju.

Sigurno će više posmatračkih nalaza o spoljnem Sunčevom sistemu doprineti shvatanju koliko često se mogao događati bliski susret zvezde i koliku tačno je on imao ulogu na stvaranje celokupnog Sunčevog sistema.

Reference i Literatura

- Adams F.C., Laughlin G. 2001. Constraints on the birth aggregate of the Solar System. *Icarus*, **150**: 151–162.
- Allen R.L., Bernstein G.M., Malhotra R. 2002. Observational Limits on a Distant Cold Kuiper Belt. *Astron. J.*, **124**: 2949–2954.
- Appel P.W.U., Fedo C.M., Moorbat S., Myers J.S. 1998. Recognizable primary volcanic and sedimentary features in a low-strain domain of the highly deformed, oldest known (~3.7–3.8 Gyr) Greenstone Belt, Isua, West Greenland. *Terra Nova*, **10**: 57–62.
- Augereau J.C., Papaloizou J.C.B. 2004. Structuring the HD 141569A circumstellar dust disk – Impact of eccentric bound stellar companions. *Astron. Astrophys.*, **414**: 1153–1165.
- Bailey M. E., Stagg, C. R. 1988. Cratering constraints on the inner Oort cloud and implications for cometary origins. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, **235**: 1–32.
- Bockelee-Morvan D., Gautier D., Lis et al. 1998. Deuterated Water in Comet C/1996 B2 (Hyakutake) and Its Implications for the Origin of Comets. *Icarus*, **133**: 147.
- Brunini A., Melita M.D. 2002. The Existence of a Planet beyond 50 AU and the Orbital Distribution of the Classical Edgeworth-Kuiper-Belt Objects. *Icarus*, **160**: 32–43.
- Dones L., Levison H. F., Duncan M. J., Weissman, P. R. 2000. Formation of the Oort cloud revisited. *Bull. Am. Astron. Soc.*, **32**: 1060.
- Dones L., Weissman P. R., Levison H. F., Duncan M. J. 2004. Oort Cloud Formation and Dynamics. *ASP Conference Proceedings*, Vol. 323 (Ed. by D. Johnstone). San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, p.371.
- Duncan M.J., Levison H.F., Budd S.M. 1995. The dynamical structure of the Kuiper belt. *Astron. J.*, **110**: 3073.
- Duncan M. J., Quinn T., Tremaine S. 1987. The formation and extent of the solar system Oort cloud. *Astron. J.*, **94**: 1330–1338.
- Eberhardt P., Reber M., Krankowsky D., Hodges R.R. 1995. The D/H and $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ratios in water from comet P/Halley. *Astron. & Astroph.*, **302**: 301.
- Edgeworth K.E. 1943. The evolution of our planetary system. *J. B. Astron. Assoc.*, **20**: 181–188.
- Fernandez J. A. 1981. On the observed excess of retrograde orbits among long-period comets. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, **197**: 265–273.
- Fernandez J.A., Ip W.H. 1981. Dynamical evolution of a cometary swarm in the outer planetary region. *Icarus*, **47**: 470–479.

- Fernandez J.A. 1997. The Formation of the Oort Cloud and the Primitive Galactic Environment. *Icarus*, **129**: 106–119.
- Fernández J.A., Gallardo T., Brunini A. 2004. The scattered disk population as a source of Oort cloud comets: evaluation of its current and past role in populating the Oort cloud. *Icarus*, **172**: 372–381.
- García-Sánchez J. 2001. Stellar encounters with the solar system. *Astron. & Astroph.*, **379**: 634–659.
- Grady C.A. *et al.* 2001. The Disk and Environment of the Herbig Be Star HD 100546. *Astron. J.*, **122**: 3396–3406.
- Holman M.J., Wisdom J. 1993. Dynamical stability in the outer Solar System and the delivery of short period comets. *Astron. J.*, **105**: 1987–1999.
- Ida S., Larwood J., Burkert A. 2000. Evidence for early stellar encounters in the orbital distribution of Edgeworth–Kuiper belt objects. *Astrophys. J.*, **528**: 351–356.
- Ikoma M., Genda H. 2006. Constraints on the mass of a habitable planet with water of nebular origin. *Astrophys. J.*, **648**: 696–706.
- Ikoma M., Genda H. 2008. Origin of the ocean on the Earth: Early evolution of water D/H in a hydrogen-rich atmosphere. *Icarus*, **194**: 42–52.
- Jewitt D., Luu J. 1993. Discovery of the candidate Kuiper belt object 1992 QB1. *Nature*, **362**: 730–732.
- Kalas P., Larwood J., A. Smith B., Schultz A. 2000. Rings in the planetesimal disk of β Pictoris. *Astrophys. J.*, **530**: 133–137.
- Kenyon S.J., Luu J.X., 1999. Accretion in the early Kuiper belt: II. Fragmentation. *Astron. J.*, **118**: 1101–1119.
- Kobayashi H., Ida S. 2001. The effects of a stellar encounter on a planetesimal disk. *Icarus*, **153**: 416–429.
- 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., Kalas P. G. 2001. Close stellar encounters with planetesimal disks: The dynamics of asymmetry in the β Pictoris system. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, **323**: 402–416.
- Laufer D., Notesco G., Bar-Nun A., Owen T. 1999. From the Interstellar Medium to Earth's Oceans via Comets—An Isotopic Study of HDO/H₂O. *Icarus*, **140**: 446–450.

- Laughlin G., Adams F.C. 1998. The modification of planetary orbits in dense open clusters. *Astrophys. J.*, **508**: L171–174.
- Leonard 1930, *Leaflet Astron. Soc. Pacific.*, **30**: 121-124.
- Levison H.F., Duncan M.J. 1997. From the Kuiper Belt to Jupiter-Family Comets: The Spatial Distribution of Ecliptic Comets. *Icarus*, **127**: 13-32.
- Levison H.F., Morbidelli A., Dones L. 2004. Sculpting the Kuiper Belt by a stellar encounter: Constraints from the Oort cloud and Scattered disk. *Astron. J.*, **128**: 2553-2563.
- Luu J.X., Jewitt D.C. 2002. Kuiper belt objects: Relics from the accretion disk of the Sun. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, **40**: 63-101.
- Malhotra R. 1995. The origin of Pluto's orbit: implications for the Solar System beyond Neptune. *Astron. J.*, **310**: 420–429.
- Malhotra R., Duncan M., Levison H. 2000. Dynamics of the Kuiper Belt. In *Protostars and Planets IV*, (ed. V. Mannings, A. Boss, S. Russell). Tucson: Univ. Arizona Press, pp. 1231-1254.
- Malmberg D.; de Angeli F., Davies M.B., Church R.P., Mackey D., Wilkinson M.I. 2007. Close encounters in young stellar clusters: implications for planetary systems in the solar neighbourhood. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, **378**: 1207-1216.
- Meier R., Owen T.C., Matthews H.E. et al. 1998. A Determination of the HDO/H₂O Ratio in Comet C/1995 O1 (Hale-Bopp). *Science*, **279**: 842.
- Meinke B., Jedicke R., Larsen J.A. 2004. An Observational Upper Limit on the Number-Density of Interstellar Comets. *Bull. Amer. Astron. Soc.*, **36**: 1168.
- Morbidelli A., Chambers J., Lunine J.I., Petit J.M., Robert F., Valsecchi G.B., Cyr K.E. 2000. Source regions and time scales for the delivery of water to Earth. *Meteorit. Planet. Sci.*, **35**: 1309–1320.
- Mumma M.J., Disanti M.A., Bonev B.P et al. 2008. An Emerging Taxonomy for Comets Based on Organic Parent Volatiles: Implications for Dynamical and Chemical Processes in the Proto-Planetary Disk. In *Asteroids, Comets, Meteors 2008*. LPI Contribution No. 1405, paper id. 8373.
- Mülläri A.A. Orlov. V.V. 1996. Encounters of the Sun with Nearby Stars in the Past and Future. *Earth, Moon and Planets.*, **72**:19-23.
- Ohtsuki K., Ida S., Nakagawa Y., Nakazawa K. 1993. Planetary accretion in the solar gravitational field. In *Protostars and Planets III* (ed. E. H. Levy and J. Lunine), Tucson: Univ. of Arizona Press, pp. 1089–1107.

- Oro J. 1961. Comets and the formation of biochemical compounds on the primitive Earth. *Nature*, **190**: 389–390.
- Ostriker E.C. 1994. Capture and induced disk accretion in young star encounters. *Astrophys. J.*, **424**: 292–318.
- Quillen A.C., Trilling D.E., Blackman E.G. 2004. The impact of a close stellar encounter on the Edgeworth-Kuiper Belt. arXiv:astro-ph/0401372.
- Press W.H., Teukolsky S.A., Vetterling W.T., Flannery B.P. 1997. *Numerical recipes in C*. Cambridge: Cambridge Univ. Press.
- Robert F., Gautier D., Dubrulle B. 2000. The Solar System D/H: Observations and theories. *Space Sci. Rev.*, **92**: 201–224.
- Sekanina Z. 1976. A probability of encounter with interstellar comets and the likelihood of their existence. *Icarus*, **27**: 123–133.
- Stern S.A. 1995. Collisional time scales in the Kuiper disk and their implications. *Astrophys. J.*, **110**: 856–868.
- Stern S.A., Colwell J.E. 1997. Accretion in the Edgeworth–Kuiper belt: forming 100–1000 km radius bodies at 30 AU and beyond. *Astron. J.*, **114**: 841–849.
- Stern S.A., Weissman P.R. 2001. Rapid collisional evolution of comets during the formation of the Oort cloud. *Nature*, **409**: 589–591.
- Thommes E. W., Duncan M. J., Levison H. F. 2002. The Formation of Uranus and Neptune among Jupiter and Saturn. *Astron. J.*, **123**: 2862–2883.
- Torbett M. V. 1986. Capture of 20 km/s approach velocity interstellar comets by three-body interactions in the planetary system. *Astron. J.*, **92**: 171–175.
- Trujillo C.A., Brown E. 2001. The radial distribution of the Kuiper belt. *Astrophys J.*, **554** (1): L95–98.
- Villanueva G. L. 2008. Measurement of D/H in Comet 8P/Tuttle: On the Origin of Earth's Water. In *Asteroids, Comets, Meteors 2008*. LPI Contribution No. 1405, paper id. 8373.
- Villanueva G. L., Mumma M. J., Bonev B. P., et al. 2009. A Sensitive Search for Deuterated Water in Comet 8p/Tuttle. *Astroph. J. Lett.*, **690**: L5–L9.
- Weissman P. R. 1994. Why are there no interstellar comets? *Bull. Am. Astron. Soc.*, **26**: 1021–1021.
- Weissman P.R. 1998a. Stellar Perturbations of the Kuiper Belt. *Bull. Amer. Astron. Soc.*, **30**: 1113.

Weissman P. R. 1998b. The Oort Cloud. *Scientific American*, 279(3):84-89.

Weissman P. R., Bottke W. F. Jr., Levison H. F. 2002. Evolution of Comets into Asteroids. In *Asteroids III (W. Bottke, A. Cellino, P. Paolicchi, and RP Binzel, eds.)*. Tucson: Univ. Arizona Press, pp. 669–686.

Prilog (kod integratora)

```

using System;
using System.IO;

namespace StellarEncounter
{
    class StellarEncounter
    {
        Random rng; //instanca klase Random

        private struct Vector
        {
            public double x, y, z;

            public Vector( double x, double y, double z)
            { //konstruktor
                this.x = x; //this = odnosi na ono vise, ne na ovu lokalnu iz konstruktora
                this.y = y;
                this.z = z;
            }
            // da li treba ukupni intezitet
            public double intensity
            {
                get
                { // vracanje vrednosti
                    //formula za intenzitet
                    return Math.Sqrt( Math.Pow(x, 2) + Math.Pow(y, 2) + Math.Pow(z, 2) );
                }
            }
        }

        private struct Particle
        {
            public double x, y, z;
            public Vector v;
            public double vel, r, a, a_init, e, i, cvor, cvor1, arg;
            public double h, h_new, h_temp, t, old_t;

            public override string ToString()
            { // metod
                return x.ToString() + " " + y.ToString() + " " + z.ToString() + " "
+ a_init.ToString() + " " + a.ToString() + " " + e.ToString() + " " + i.ToString() + " "
+ vel.ToString() + " " + cvor.ToString() + " " + arg.ToString();
            }
        }
    }
}

```

```

}

private struct MassiveParticle
{
    public double x, y, z, m;
    public Vector v;
    public double e, i, w, tanom, r;
    public double t;

    public override string ToString()
    { // metod
        return x.ToString() + " " + y.ToString() + " " + z.ToString();
    }

    public MassiveParticle(
        double x, double y, double z, double m, Vector v, double e, double i, double w,
        double tanom, double r, double t)
    { //konstruktor
        this.x = x;
        this.y = y;
        this.z = z;
        this.m = m;
        this.v = v;
        this.e = e;
        this.i = i;
        this.w = w;
        this.tanom = tanom;
        this.r = r;
        this.t = t;
    }

    }
}

MassiveParticle Sun = new MassiveParticle(0, 0, 0, 1, new Vector(0, 0, 0), 0, 0, 0, 0, 0,
0);

static void Main(string[] args)
{
    StellarEncounter se = new StellarEncounter();
    se.Run();
}

void Run()
{
}

```

```

// brisanje svih fajlova
for(int i = 0; i < 1000; i++) // i < broja intervala
    File.Delete("asteroid_data_" + i.ToString() + ".dat");

int time = 30000000; // broj koraka //vreme = time * h // 30000000=3 iljade god
const string outputfilename = "output_orb.dat";
const string outputfilename_star = "krknjanac//output_star.dat";

rng = new Random(); //inicijalizacija objekta rng

// ubaceno preko konstruktora
MassiveParticle Nemesis = new MassiveParticle(200, -900, 0, 1, new Vector (0.1725,
0.8, 0), 1, 0, 0, 1.3*Math.PI, 0, 0);

Particle[] Asteroid = CreateAsteroids(Sun); // niz i metod

// integrator //

double b31 = 0.075; double b32 = 0.225;
double b41 = 0.3; double b42 = -0.9; double b43 = 1.2;
double b51 = -0.203703703703704; double b52 = 2.5; double b53 = -
2.592592592592593; double b54 = 1.296296296296296;
double b61 = 0.029495804398148; double b62 = 0.341796875; double b63 =
0.041594328703704; double b64 = 0.400345413773148; double b65 = 0.061767578125;
double c1 = 0.097883597883598; double c3 = 0.402576489533011; double c4 =
0.210437710437710; double c6 = 0.289102202145680; // c2 i c5 su nule pa je i jednacina
konacnog pomeraja skracena u odnosu na knjigu
double ce1 = 0.102177372685185; double ce3 = 0.383907903439153; double ce4 =
0.244592737268518; double ce5 = 0.019321986607143; double ce6 = 0.25;

double G = 39.430670258; // konverzija konstante
//double G = 6.67 * Math.Pow(10, -11);

// double output_interval = 5; //br. godina posle kojih zapisuje u fajl trenutni položaj

double h_star = 0.0001; //pazi na nemesis.h!!!!!!!!!!!!!! //korak je u god
double diff_fix = 0.000000006682750; // 6.68274981789506 * Math.Pow(10,
-9);
//double diff_fix = 1000; // u metrima

for (int t = 0; t < time; t++)
{
    //ovde trazi koordinate zvezde i Neptuna
    Nemesis = GetNewEncCoo(Nemesis); // predajem mu Nemesis

    if (t == 6000000)
    {

```

```

        Console.WriteLine("6000000");
    }
    else if (t == 10000000)
    {
        Console.WriteLine("10000000");
    }
    else if (t == 14000000)
    {
        Console.WriteLine("14000000");
    }
    else if (t == 18000000)
    {
        Console.WriteLine("18000000");
    }

#region Integrator
    for (int i = 0; i < Asteroid.GetLength(0); i++)
    {

//if(interval2 - interval1 == 1)

        int god = t / 10000;
        int deviser = 40000; //godine koraka za upis
        int Remaind;
        int intResult;
        intResult = Math.DivRem( t, deviser, out Remaind );

        if( Remaind == 0 )
        {

            // ispisi u file
            string filename = "asteroid_data_" + god.ToString() + ".dat";
            FileStream fs_asteroid = new FileStream( filename, FileMode.Append,
FileAccess.Write, FileShare.None );
            StreamWriter sw_asteroid = new StreamWriter( fs_asteroid );

            // ovo ide u file
            sw_asteroid.WriteLine(Asteroid[i].x.ToString() + "      "
+ Asteroid[i].y.ToString() + "      " + Sun.x.ToString() + "      " + Sun.y.ToString() + "      "
+ Nemesis.x.ToString() + "      " + Nemesis.y.ToString() + "      " + Asteroid[i].v.x.ToString()
+ "      " + Asteroid[i].v.y.ToString() );

            sw_asteroid.Flush(); // da se isprazni bafer kad zavrzi sa fajlom
            sw_asteroid.Close(); //zavrsen rad sa fajlom;
            fs_asteroid.Close();
        }
    }
}

```

```

if (( Nemesis.t - Asteroid[i].t > -h_star/2) && ( Nemesis.t - Asteroid[i].t <=
(h_star/2)))
{
    // ovde ide matematicki kod //

    //double h = 20000; //korak
    //koordinate zvezde!!!!!!!!!!!!!!!!

repeat:      //mesto gde ce da se vraca ako smanji korak

    if (Asteroid[i].h < h_star)
    {
        Asteroid[i].h = h_star;
    }

    //F(rj)
    double rj = Math.Pow(Math.Sqrt(Math.Pow(Asteroid[i].x, 2) +
Math.Pow(Asteroid[i].y, 2) + Math.Pow(Asteroid[i].z, 2)), 3);           //dole intezitet
u jed. kretanja za posebne clanove
    double R_rj = Math.Pow(Math.Sqrt(Math.Pow(Nemesis.x - Asteroid[i].x,
2) + Math.Pow(Nemesis.y - Asteroid[i].y, 2) + Math.Pow(Nemesis.z - Asteroid[i].z, 2)), 3);
    double R = Math.Pow(Math.Sqrt(Math.Pow(Nemesis.x, 2) +
Math.Pow(Nemesis.y, 2) + Math.Pow(Nemesis.z, 2)), 3);
    double EquationX = G * (( - Sun.m * Asteroid[j].x / rj ) + Nemesis.m *
(( (Nemesis.x - Asteroid[i].x) / R_rj ) - (Nemesis.x / R))); // diferencijalna kretanja za posebne
ose
    double EquationY = G * (( - Sun.m * Asteroid[i].y / rj ) + Nemesis.m *
(( (Nemesis.y - Asteroid[i].y) / R_rj ) - (Nemesis.y / R)));
    double EquationZ = G * (( - Sun.m * Asteroid[i].z / rj ) + Nemesis.m *
(( (Nemesis.z - Asteroid[i].z) / R_rj ) - (Nemesis.z / R)));


    //***** k = 1 ***** red1

    /* pomeraj = h * brzina */
    double r1_x = Asteroid[i].h * Asteroid[i].v.x;
    double r1_y = Asteroid[i].h * Asteroid[i].v.y;
    double r1_z = Asteroid[i].h * Asteroid[i].v.z;
    /* promena brzine = h * ubrzanje */
    double v1_x = Asteroid[i].h * EquationX;
    double v1_y = Asteroid[i].h * EquationY;
    double v1_z = Asteroid[i].h * EquationZ;

    //***** k = 2 ***** red2

```

```

//F(rj + b21*r1_?) double b21 = 1/5;
double rj2 = Math.Pow(Math.Sqrt(Math.Pow(Asteroid[i].x + r1_x/5, 2) +
Math.Pow(Asteroid[i].y + r1_y/5, 2) + Math.Pow(Asteroid[i].z + r1_z/5, 2)), 3);

double R_rj2 = Math.Pow(Math.Sqrt(Math.Pow(Nemesis.x - (Asteroid[i].x +
r1_x/5), 2) + Math.Pow(Nemesis.y - (Asteroid[i].y + r1_y/5), 2) + Math.Pow(Nemesis.z -
(Asteroid[i].z + r1_z/5), 2)), 3);
double EquationX2 = (G * (( - Sun.m * (Asteroid[i].x + r1_x/5) / rj2 ) +
Nemesis.m * (( (Nemesis.x - (Asteroid[i].x + r1_x/5)) / R_rj2 ) - (Nemesis.x / R)));
double EquationY2 = (G * (( - Sun.m * (Asteroid[i].y + r1_y/5) / rj2 ) +
Nemesis.m * (( (Nemesis.y - (Asteroid[i].y + r1_y/5)) / R_rj2 ) - (Nemesis.y / R)));
double EquationZ2 = (G * (( - Sun.m * (Asteroid[i].z + r1_z/5) / rj2 ) +
Nemesis.m * (( (Nemesis.z - (Asteroid[i].z + r1_z/5)) / R_rj2 ) - (Nemesis.z / R)));

double r2_x = Asteroid[i].h * (Asteroid[i].v.x + v1_x/5);
double r2_y = Asteroid[i].h * (Asteroid[i].v.y + v1_y/5);
double r2_z = Asteroid[i].h * (Asteroid[i].v.z + v1_z/5);
double v2_x = Asteroid[i].h * EquationX2;
double v2_y = Asteroid[i].h * EquationY2;
double v2_z = Asteroid[i].h * EquationZ2;

//***** k = 3 ***** red3
//F(rj + b31* r1_? + b32* r2_?)
double rj3 = Math.Pow(Math.Sqrt(Math.Pow(Asteroid[i].x + b31*r1_x +
b32*r2_x, 2) + Math.Pow(Asteroid[i].y + b31*r1_y + b32*r2_y, 2) + Math.Pow(Asteroid[i].z +
b31*r1_z + b32*r2_z, 2)), 3);
double R_rj3 = Math.Pow(Math.Sqrt(Math.Pow(Nemesis.x - (Asteroid[i].x +
b31*r1_x + b32*r2_x), 2) + Math.Pow(Nemesis.y - (Asteroid[i].y + b31*r1_y + b32*r2_y), 2) +
Math.Pow(Nemesis.z - (Asteroid[i].z + b31*r1_z + b32*r2_z), 2)), 3);
double EquationX3 = (G * (( - Sun.m * (Asteroid[i].x + b31*r1_x +
b32*r2_x) / rj3 ) + Nemesis.m * (( (Nemesis.x - (Asteroid[i].x + b31*r1_x + b32*r2_x)) / R_rj3 ) - (Nemesis.x / R)));
double EquationY3 = (G * (( - Sun.m * (Asteroid[i].y + b31*r1_y +
b32*r2_y) / rj3 ) + Nemesis.m * (( (Nemesis.y - (Asteroid[i].y + b31*r1_y + b32*r2_y)) / R_rj3 ) - (Nemesis.y / R)));
double EquationZ3 = (G * (( - Sun.m * (Asteroid[i].z + b31*r1_z +
b32*r2_z) / rj3 ) + Nemesis.m * (( (Nemesis.z - (Asteroid[i].z + b31*r1_z + b32*r2_z)) / R_rj3 ) - (Nemesis.z / R)));

double r3_x = Asteroid[i].h * (Asteroid[i].v.x + b32*v1_x + b32*v2_x);
double r3_y = Asteroid[i].h * (Asteroid[i].v.y + b32*v1_y + b32*v2_y);
double r3_z = Asteroid[i].h * (Asteroid[i].v.z + b32*v1_z + b32*v2_z);
double v3_x = Asteroid[i].h * EquationX3;
double v3_y = Asteroid[i].h * EquationY3;
double v3_z = Asteroid[i].h * EquationZ3;

```

```

//***** k = 4 ***** red4
//F(rj + b41*r1_? + b42*r2_? + b43*r3_?)
double rj4 = Math.Pow(Math.Sqrt(Math.Pow(Asteroid[i].x + b41*r1_x +
b42*r2_x + b43*r3_x, 2) + Math.Pow(Asteroid[i].y + b41*r1_y + b42*r2_y + b43*r3_y, 2) +
Math.Pow(Asteroid[i].z + b41*r1_z + b42*r2_z + b43*r3_z, 2)), 3);

double R_rj4 = Math.Pow(Math.Sqrt(Math.Pow(Nemesis.x - (Asteroid[i].x +
b41*r1_x + b42*r2_x + b43*r3_x), 2) + Math.Pow(Nemesis.y - (Asteroid[i].y + b41*r1_y +
b42*r2_y + b43*r3_y), 2) + Math.Pow(Nemesis.z - (Asteroid[i].z + b41*r1_z + b42*r2_z +
b43*r3_z), 2)), 3);

double EquationX4 = (G * (( - Sun.m * (Asteroid[i].x + b41*r1_x +
b42*r2_x + b43*r3_x) / rj4 ) + Nemesis.m * (( (Nemesis.x - (Asteroid[i].x + b41*r1_x +
b42*r2_x + b43*r3_x)) / R_rj4 ) - (Nemesis.x / R)));
double EquationY4 = (G * (( - Sun.m * (Asteroid[i].y + b41*r1_y +
b42*r2_y + b43*r3_y) / rj4 ) + Nemesis.m * (( (Nemesis.y - (Asteroid[i].y + b41*r1_y +
b42*r2_y + b43*r3_y)) / R_rj4 ) - (Nemesis.y / R)));
double EquationZ4 = (G * (( - Sun.m * (Asteroid[i].z + b41*r1_z +
b42*r2_z + b43*r3_z) / rj4 ) + Nemesis.m * (( (Nemesis.z - (Asteroid[i].z + b41*r1_z + b42*r2_z +
b43*r3_z)) / R_rj4 ) - (Nemesis.z / R)));

double r4_x = Asteroid[i].h * (Asteroid[i].v.x + b41*v1_x + b42*v2_x +
b43*v3_x);
double r4_y = Asteroid[i].h * (Asteroid[i].v.y + b41*v1_y + b42*v2_y +
b43*v3_y);
double r4_z = Asteroid[i].h * (Asteroid[i].v.z + b41*v1_z + b42*v2_z +
b43*v3_z);
double v4_x = Asteroid[i].h * EquationX4;
double v4_y = Asteroid[i].h * EquationY4;
double v4_z = Asteroid[i].h * EquationZ4;

//***** k = 5 ***** red5
//F(rj + b51*r1_? + b52*r2_? + b53*r3_? + b54*r4_?)
double rj5 = Math.Pow(Math.Sqrt(Math.Pow(Asteroid[i].x + b51*r1_x +
b52*r2_x + b53*r3_x + b54*r4_x, 2) + Math.Pow(Asteroid[i].y + b51*r1_y + b52*r2_y +
b53*r3_y + b54*r4_y, 2) + Math.Pow(Asteroid[i].z + b51*r1_z + b52*r2_z + b53*r3_z +
b54*r4_z, 2)), 3);

double R_rj5 = Math.Pow(Math.Sqrt(Math.Pow(Nemesis.x - (Asteroid[i].x +
b51*r1_x + b52*r2_x + b53*r3_x + b54*r4_x), 2) + Math.Pow(Nemesis.y - (Asteroid[i].y +
b51*r1_y + b52*r2_y + b53*r3_y + b54*r4_y), 2) + Math.Pow(Nemesis.z - (Asteroid[i].z +
b51*r1_z + b52*r2_z + b53*r3_z + b54*r4_z), 2)), 3);

double EquationX5 = (G * (( - Sun.m * (Asteroid[i].x + b51*r1_x +
b52*r2_x + b53*r3_x + b54*r4_x) / rj5 ) + Nemesis.m * (( (Nemesis.x - (Asteroid[i].x +
b51*r1_x + b52*r2_x + b53*r3_x + b54*r4_x)) / R_rj5 ) - (Nemesis.x / R)));
double EquationY5 = (G * (( - Sun.m * (Asteroid[i].y + b51*r1_y +
b52*r2_y + b53*r3_y + b54*r4_y) / rj5 ) + Nemesis.m * (( (Nemesis.y - (Asteroid[i].y +
b51*r1_y + b52*r2_y + b53*r3_y + b54*r4_y)) / R_rj5 ) - (Nemesis.y / R)));

```

```

    double EquationZ5 = (G * (( - Sun.m * (Asteroid[i].z + b51*r1_z +
b52*r2_z + b53*r3_z + b54*r4_z) / rj5 ) + Nemesis.m * (( (Nemesis.z - (Asteroid[i].z +
b51*r1_z + b52*r2_z + b53*r3_z + b54*r4_z)) / R_rj5 ) - (Nemesis.z / R))));

    double r5_x = Asteroid[i].h * (Asteroid[i].v.x + b51*v1_x + b52*v2_x +
b53*v3_x + b54*v4_x);
    double r5_y = Asteroid[i].h * (Asteroid[i].v.y + b51*v1_y + b52*v2_y +
b53*v3_y + b54*v4_y);
    double r5_z = Asteroid[i].h * (Asteroid[i].v.z + b51*v1_z + b52*v2_z +
b53*v3_z + b54*v4_z);
    double v5_x = Asteroid[i].h * EquationX5;
    double v5_y = Asteroid[i].h * EquationY5;
    double v5_z = Asteroid[i].h * EquationZ5;

    //***** k = 6 ******
    //F(rj + b61*r1_? + b62*r2_? + b63*r3_? + b64*r4_? + b65*r5_?)
    double rj6 = Math.Pow(Math.Sqrt(Math.Pow(Asteroid[i].x + b61*r1_x +
b62*r2_x + b63*r3_x + b64*r4_x + b65*r5_x, 2) + Math.Pow(Asteroid[i].y + b61*r1_y +
b62*r2_y + b63*r3_y + b64*r4_y + b65*r5_y, 2) + Math.Pow(Asteroid[i].z + b61*r1_z +
b62*r2_z + b63*r3_z + b64*r4_z + b65*r5_z, 2)), 3);

    double R_rj6 = Math.Pow(Math.Sqrt(Math.Pow(Nemesis.x - (Asteroid[i].x +
b61*r1_x + b62*r2_x + b63*r3_x + b64*r4_x + b65*r5_x), 2) + Math.Pow(Nemesis.y -
(Asteroid[i].y + b61*r1_y + b62*r2_y + b63*r3_y + b64*r4_y + b65*r5_y), 2) +
Math.Pow(Nemesis.z - (Asteroid[i].z + b61*r1_z + b62*r2_z + b63*r3_z + b64*r4_z +
b65*r5_z), 2)), 3);

    double EquationX6 = (G * (( - Sun.m * (Asteroid[i].x + b61*r1_x +
b62*r2_x + b63*r3_x + b64*r4_x + b65*r5_x) / rj6 ) + Nemesis.m * (( (Nemesis.x -
(Asteroid[i].x + b61*r1_x + b62*r2_x + b63*r3_x + b64*r4_x + b65*r5_x)) / R_rj6 ) -
(Nemesis.x / R))));

    double EquationY6 = (G * (( - Sun.m * (Asteroid[i].y + b61*r1_y +
b62*r2_y + b63*r3_y + b64*r4_y + b65*r5_y) / rj6 ) + Nemesis.m * (( (Nemesis.y -
(Asteroid[i].y + b61*r1_y + b62*r2_y + b63*r3_y + b64*r4_y + b65*r5_y)) / R_rj6 ) -
(Nemesis.y / R))));

    double EquationZ6 = (G * (( - Sun.m * (Asteroid[i].z + b61*r1_z +
b62*r2_z + b63*r3_z + b64*r4_z + b65*r5_z) / rj6 ) + Nemesis.m * (( (Nemesis.z -
(Asteroid[i].z + b61*r1_z + b62*r2_z + b63*r3_z + b64*r4_z + b65*r5_z)) / R_rj6 ) -
(Nemesis.z / R))));

    double r6_x = Asteroid[i].h * (Asteroid[i].v.x + b61*v1_x + b62*v2_x +
b63*v3_x + b64*v4_x + b65*v5_x);
    double r6_y = Asteroid[i].h * (Asteroid[i].v.y + b61*v1_y + b62*v2_y +
b63*v3_y + b64*v4_y + b65*v5_y);
    double r6_z = Asteroid[i].h * (Asteroid[i].v.z + b61*v1_z + b62*v2_z +
b63*v3_z + b64*v4_z + b65*v5_z);
    double v6_x = Asteroid[i].h * EquationX6;
    double v6_y = Asteroid[i].h * EquationY6;
    double v6_z = Asteroid[i].h * EquationZ6;

```

```

***** konacni koeficijenti i pomeraj *****
double r_x = c1*r1_x + c3*r3_x + c4*r4_x + c6*r6_x;
double r_y = c1*r1_y + c3*r3_y + c4*r4_y + c6*r6_y;
double r_z = c1*r1_z + c3*r3_z + c4*r4_z + c6*r6_z;
double v_x = c1*v1_x + c3*v3_x + c4*v4_x + c6*v6_x;
double v_y = c1*v1_y + c3*v3_y + c4*v4_y + c6*v6_y;
double v_z = c1*v1_z + c3*v3_z + c4*v4_z + c6*v6_z;

***** embedded RK4, samo za rastojanje *****
double re_x = ce1*r1_x + ce3*r3_x + ce4*r4_x + ce5*r5_x + ce6*r6_x;
double re_y = ce1*r1_y + ce3*r3_y + ce4*r4_y + ce5*r5_y + ce6*r6_y;
double re_z = ce1*r1_z + ce3*r3_z + ce4*r4_z + ce5*r5_z + ce6*r6_z;

***** razlika izmedju RK5 i RK4e, greska samo za rastojanje *****
double diff = 0;
double diff_x = Math.Abs( r_x - re_x );
double diff_y = Math.Abs( r_y - re_y );
double diff_z = Math.Abs( r_z - re_z );

//           Console.WriteLine("x {0}", diff_x);
//           Console.WriteLine("y {0}", diff_y);
//           Console.WriteLine("z {0}", diff_z);

// trazenje najvece greske
if( diff_x >= diff_y && diff_x >= diff_z )
{
    diff = diff_x;
}
else if( diff_y >= diff_x && diff_y >= diff_z )
{
    diff = diff_y;
}
else if( diff_z >= diff_x && diff_z >= diff_y )
{
    diff = diff_z;
}

//           Console.WriteLine("uk {0}", diff);
//           Console.WriteLine("ast.h, {0}", Asteroid[i].h);
//           Console.WriteLine("{0}", t);

if( diff <= diff_fix )

```

```

{
    Asteroid[i].h_temp = Asteroid[i].h * Math.Pow( diff_fix / diff, 0.2 );
// treba korak da se pamti za svaki asteroid
    Asteroid[i].h_new = Asteroid[i].h_temp;
    Asteroid[i].h_new = Math.Round(Asteroid[i].h_new, 4);
    if (Asteroid[i].h_new > Asteroid[i].h_temp && Asteroid[i].h_temp >
0.0001)
    {
        Asteroid[i].h_new -= 0.0001;
    }
    Asteroid[i].old_t = Asteroid[i].t;
    Asteroid[i].t += Asteroid[i].h;
    Asteroid[i].h = Asteroid[i].h_new;
}
else if ( diff > diff_fix && Asteroid[i].h > h_star )
{
    Asteroid[i].h_temp = Asteroid[i].h * Math.Pow( diff_fix / diff, 0.2 );
    Asteroid[i].h_new = Asteroid[i].h_temp;
    Asteroid[i].h_new = Math.Round(Asteroid[i].h_new, 4);
    if (Asteroid[i].h_new > Asteroid[i].h_temp && Asteroid[i].h_temp >
0.0001)
    {
        Asteroid[i].h_new -= 0.0001;
    }
    Asteroid[i].h = Asteroid[i].h_new;           //;//oduzimanje u godinama
(30s)
    goto repeat;
}
else if ( Asteroid[i].h == h_star )
{
    Asteroid[i].h_temp = Asteroid[i].h * Math.Pow( diff_fix / diff, 0.2 );
// treba korak da se pamti za svaki asteroid
    Asteroid[i].h_new = Asteroid[i].h_temp;
    Asteroid[i].h_new = Math.Round(Asteroid[i].h_new, 4);
    if (Asteroid[i].h_new > Asteroid[i].h_temp && Asteroid[i].h_temp >
0.0001)
    {
        Asteroid[i].h_new -= 0.0001;
    }
    Asteroid[i].t += Asteroid[i].h;
    Asteroid[i].h = Asteroid[i].h_new;
}

Asteroid[i].x += r_x;
Asteroid[i].y += r_y;
Asteroid[i].z += r_z;
Asteroid[i].v.x += v_x;
Asteroid[i].v.y += v_y;

```

```

Asteroid[i].v.z += v_z;
// Console.WriteLine("{0}", Asteroid[i].x);

}
//kraj if-a
//Console.WriteLine("0");
//www.psrd.hawaii.edu/Aug01/bombardment.htm (neptune formation)
}

}

#endregion

//konacni položaji, da uljez postane sunce
Nemesis.x -= Nemesis.x;
Nemesis.y -= Nemesis.y;
Nemesis.z -= Nemesis.z;

Sun.x -= Nemesis.x;
Sun.y -= Nemesis.y;
Sun.z -= Nemesis.z;

for (int i = 0; i < Asteroid.GetLength(0); i++)
{
Asteroid[i].x -= Nemesis.x;
Asteroid[i].y -= Nemesis.y;
Asteroid[i].z -= Nemesis.z;
}

Console.WriteLine("{0}", Nemesis.m);
Console.WriteLine("Kraj mozganja");

#region Orbitalni elementi asteroida

double GM = 39.4306702583658; //svedene jedinice
//double GM = 1.32712440018*Math.Pow(10, 20); //mks sistem

for (int i = 0; i < Asteroid.GetLength(0); i++)
{
    Asteroid[i].r = Math.Sqrt( Math.Pow(Asteroid[i].x, 2) + Math.Pow(Asteroid[i].y,
2) + Math.Pow(Asteroid[i].z, 2));
    Asteroid[i].vel = Math.Sqrt( Math.Pow(Asteroid[i].v.x, 2) +
Math.Pow(Asteroid[i].v.y, 2) + Math.Pow(Asteroid[i].v.z, 2));
    Asteroid[i].a = 1 / (2/Asteroid[i].r - Math.Pow(Asteroid[i].vel, 2) / GM);

    double h_x = Asteroid[i].y * Asteroid[i].v.z - Asteroid[i].z * Asteroid[i].v.y;
    double h_y = Asteroid[i].z * Asteroid[i].v.x - Asteroid[i].x * Asteroid[i].v.z;
}

```

```

double h_z = Asteroid[i].x * Asteroid[i].v.y - Asteroid[i].y * Asteroid[i].v.x;
double h_na2 = Math.Pow(h_x, 2) + Math.Pow(h_y, 2) + Math.Pow(h_z, 2);
double h = Math.Sqrt(h_na2);
double p = h_na2 / GM;
double q = Asteroid[i].x * Asteroid[i].v.x + Asteroid[i].y * Asteroid[i].v.y +
Asteroid[i].z * Asteroid[i].v.z;
Asteroid[i].e = Math.Sqrt(1 - (p/Asteroid[i].a));
Asteroid[i].i = Math.Acos(h_z / h) * 57.295779513082321;
Asteroid[i].cvor1 = Arctan2(h_x, -h_y);
Asteroid[i].cvor = Asteroid[i].cvor1 * 57.295779513082321;

double anom_x = Math.Pow( h, 2 ) / ( Asteroid[i].r * GM ) - 1;
double anom_y = h * q / ( Asteroid[i].r * GM );
double anom = Arctan2( anom_y, anom_x );
double cos_zbir = (Asteroid[i].x * Math.Cos(Asteroid[i].cvor1) + Asteroid[i].y *
Math.Sin(Asteroid[i].cvor1)) / Asteroid[i].r;
double sin_zbir = 0;
if (Asteroid[i].z == 0)
{
    sin_zbir = (Asteroid[i].y * Math.Cos(Asteroid[i].cvor1) - Asteroid[i].x *
Math.Sin(Asteroid[i].cvor1)) / Asteroid[i].r;
}
else
{
    sin_zbir = Asteroid[i].z / (Asteroid[i].r * Math.Sin(Asteroid[i].i));
}
Asteroid[i].arg = ( Arctan2(sin_zbir, cos_zbir) - anom );
if (Asteroid[i].arg < 0)
{
    Asteroid[i].arg += 2*Math.PI;
}
Asteroid[i].arg = Asteroid[i].arg * 57.295779513082321;
}

#endifregion

#region ispis podataka u fajl za zamorcice
FileStream fs = new FileStream( outputfilename, FileMode.Create, FileAccess.Write,
FileShare.None );
StreamWriter sw = new StreamWriter( fs );

for (int i = 0; i < Asteroid.GetLength(0); i++)
    sw.WriteLine(Asteroid[i].ToString());

sw.Flush(); // da se isprazni bafer kad zavrsti sa fajлом
sw.Close(); //zavrsen rad sa fajлом;
fs.Close();

#endifregion

```

```
#region skupljeno
```

```
#region ispis podataka u fajl za obrite zamorcica
```

```
FileStream fs3 = new FileStream( outputfilename_ast_orb, FileMode.Create,
FileAccess.Write, FileShare.None );
StreamWriter sw3 = new StreamWriter( fs3 );
```

```
for (int i = 0; i < Asteroid.GetLength(0); i++)
    sw3.WriteLine(Asteroid[i].ToString1());
```

```
sw3.Flush(); // da se isprazni bafer kad zavrsi sa fajлом
```

```
sw3.Close(); //zavrsen rad sa fajлом;
```

```
fs3.Close();
```

```
#endregion
```

```
#endregion
```

```
#region ispis podataka u fajl za uljeza
```

```
FileStream fs1 = new FileStream( outputfilename_star, FileMode.Create,
FileAccess.Write, FileShare.None );
StreamWriter sw1 = new StreamWriter( fs1 );
```

```
for (int i = 0; i < time; i++)
    sw1.WriteLine(StarPosition[i].ToString());
```

```
sw1.Flush(); // da se isprazni bafer kad zavrsi sa fajлом
```

```
sw1.Close(); //zavrsen rad sa fajлом;
```

```
fs1.Close();
```

```
#endregion
```

```
// wait for enter
```

```
Console.WriteLine("I sve je frnjnuo na hard");
```

```
}
```

```
#region Kraj Run-a
```

```
#endregion
```

```
#region Create Belt
```

```
Particle[] CreateAsteroids( MassiveParticle CentralParticle ) // ( tip, naziv novog
parametra ); metod je CreateAsteroids
```

```
{
```

```
const int ParticleCount = 10000;
```

```
const double MinDistance = 250;
```

```

const double MaxDistance = 500;

Particle[] Asteroid = new Particle[ParticleCount]; //niz

for (int i = 0; i < ParticleCount; i++)
{
    double TrueAnomaly = GetRandomNumber ( 0, 2*Math.PI );
    double dist = GetRandomNumber ( MinDistance, MaxDistance );

    Asteroid[i].x = CentralParticle.x + dist*Math.Cos(TrueAnomaly);
    Asteroid[i].y = CentralParticle.y + dist*Math.Sin(TrueAnomaly);
    Asteroid[i].z = 0;
    Asteroid[i].a_init = Math.Sqrt( Math.Pow(Asteroid[i].x, 2) +
Math.Pow(Asteroid[i].y, 2) + Math.Pow(Asteroid[i].z, 2));
    double velocity = 8.88315259684975 * Math.Sqrt( 1/dist - 1/(2*dist) ); // AU/god
    //double velocity = 42121.9 * Math.Sqrt( 1/(dist/AU) - 1/(2*dist/AU) ); // m/s
    Vector v = new Vector();
    v.x = - Math.Sin(TrueAnomaly) * velocity;
    v.y = Math.Cos(TrueAnomaly) * velocity;
    v.z = 0;

    Asteroid[i].v = v;

    Asteroid[i].h = 0.001; //pocetni korak //god
    //Asteroid[i].h = 31557.6; //pocetni korak //sec
    Asteroid[i].t = 0.0001; //god
    //Asteroid[i].t = 3155.76; //sec

}
return Asteroid;
}

#endif

#region RandomNumber

double GetRandomNumber( double Min, double Max ) // metod, na pocetku mu kazem
sta mi vraca (double), ili nista (void)
{
    double randnum = rng.NextDouble();
    randnum = randnum * (Max - Min) + Min;

    return randnum;
}

#endregion

#region Star coordinates

```

```

MassiveParticle GetNewEncCoo(MassiveParticle Star)
{
    double G = 39.430670258;           // novo konverzija konstante
    //double G = 6.67 * Math.Pow(10, -11); //SI G

    double h = 0.0001; //korak           // korak je u god //0.0001 god = 3155,76 s
    //double h = 5000; //korak          // korak je u sec

    // ovde ide matematicki kod //
    //F(rj)
    double r = Math.Pow(Math.Sqrt(Math.Pow(Star.x, 2) + Math.Pow(Star.y, 2) +
    Math.Pow(Star.z, 2)), 3);           //dole intezitet u jed. kretanja za
    posebne clanove
    double EquationXz = G * (-Sun.m * Star.x / r); // diferencijalna kretanja za zvezdu
    double EquationYz = G * (-Sun.m * Star.y / r);
    double EquationZz = G * (-Sun.m * Star.z / r);

    double EquationXs = G * (-Star.m * Star.x / r); // diferencijalna kretanja za sunce,
da li koordinate zvezde
    double EquationYs = G * (-Star.m * Star.y / r);
    double EquationZs = G * (-Star.m * Star.z / r);

    // ***** k = 1 ***** red1

    //uticaj Sunca na zvezdu
    /* pomeraj = h * brzina */
    double rz1_x = h * Star.v.x;
    double rz1_y = h * Star.v.y;
    double rz1_z = h * Star.v.z;
    /* promena brzine = h * ubrzanje */
    double vz1_x = h * EquationXz;
    double vz1_y = h * EquationYz;
    double vz1_z = h * EquationZz;

    //uticaj zvezde na Sunce
    /* pomeraj = h * brzina */
    double rs1_x = h * 0;
    double rs1_y = h * 0;
    double rs1_z = h * 0;
    /* promena brzine = h * ubrzanje */
    double vs1_x = h * EquationXs;
    double vs1_y = h * EquationYs;
    double vs1_z = h * EquationZs;
}

```

```

// ***** k = 2 *****
//F(r + r1_?/2)

        //sunce na zvezdu
double rz2 = Math.Pow(Math.Sqrt(Math.Pow(Star.x + rz1_x/2, 2) + Math.Pow(Star.y
+ rz1_y/2, 2) + Math.Pow(Star.z + rz1_z/2, 2)), 3);
double EquationXz2 = G * (- Sun.m * (Star.x + rz1_x/2) / rz2 );
double EquationYz2 = G * (- Sun.m * (Star.y + rz1_y/2) / rz2 );
double EquationZz2 = G * (- Sun.m * (Star.z + rz1_z/2) / rz2 );

double rz2_x = h * (Star.v.x + vz1_x/2);
double rz2_y = h * (Star.v.y + vz1_y/2);
double rz2_z = h * (Star.v.z + vz1_z/2);
double vz2_x = h * EquationXz2;
double vz2_y = h * EquationYz2;
double vz2_z = h * EquationZz2;

        //zvezda na sunce
double rs2 = Math.Pow(Math.Sqrt(Math.Pow(Star.x + rs1_x/2, 2) + Math.Pow(Star.y
+ rs1_y/2, 2) + Math.Pow(Star.z + rs1_z/2, 2)), 3);
double EquationXs2 = G * (- Sun.m * (Star.x + rs1_x/2) / rs2 );
double EquationYs2 = G * (- Sun.m * (Star.y + rs1_y/2) / rs2 );
double EquationZs2 = G * (- Sun.m * (Star.z + rs1_z/2) / rs2 );

double rs2_x = h * (0 + vs1_x/2);
double rs2_y = h * (0 + vs1_y/2);
double rs2_z = h * (0 + vs1_z/2);
double vs2_x = h * EquationXs2;
double vs2_y = h * EquationYs2;
double vs2_z = h * EquationZs2;

// ***** k = 3 *****
//F(r + r2_?/2)

        //sunce na zvezdu
double rz3 = Math.Pow(Math.Sqrt(Math.Pow(Star.x + rz2_x/2, 2) + Math.Pow(Star.y
+ rz2_y/2, 2) + Math.Pow(Star.z + rz2_z/2, 2)), 3);
double EquationXz3 = G * (- Sun.m * (Star.x + rz2_x/2) / rz3 );
double EquationYz3 = G * (- Sun.m * (Star.y + rz2_y/2) / rz3 );
double EquationZz3 = G * (- Sun.m * (Star.z + rz2_z/2) / rz3 );

double rz3_x = h * (Star.v.x + vz2_x/2);
double rz3_y = h * (Star.v.y + vz2_y/2);
double rz3_z = h * (Star.v.z + vz2_z/2);
double vz3_x = h * EquationXz3;
double vz3_y = h * EquationYz3;

```

```

double vz3_z = h * EquationZz3;

        //zvezda na sunce
double rs3 = Math.Pow(Math.Sqrt(Math.Pow(Star.x + rs2_x/2, 2) + Math.Pow(Star.y
+ rs2_y/2, 2) + Math.Pow(Star.z + rs2_z/2, 2)), 3);
double EquationXs3 = G * ( - Sun.m * (Star.x + rs2_x/2) / rs3 );
double EquationYs3 = G * ( - Sun.m * (Star.y + rs2_y/2) / rs3 );
double EquationZs3 = G * ( - Sun.m * (Star.z + rs2_z/2) / rs3 );

double rs3_x = h * (0 + vs2_x/2);
double rs3_y = h * (0 + vs2_y/2);
double rs3_z = h * (0 + vs2_z/2);
double vs3_x = h * EquationXs3;
double vs3_y = h * EquationYs3;
double vs3_z = h * EquationZs3;

// ***** k = 4 *****
//F(r + r3_?)  

//sunce na zvezdu
double rz4 = Math.Pow(Math.Sqrt(Math.Pow(Star.x + rz3_x, 2) + Math.Pow(Star.y +
rz3_y, 2) + Math.Pow(Star.z + rz3_z, 2)), 3);
double EquationXz4 = G * ( - Sun.m * (Star.x + rz3_x) / rz4 );
double EquationYz4 = G * ( - Sun.m * (Star.y + rz3_y) / rz4 );
double EquationZz4 = G * ( - Sun.m * (Star.z + rz3_z) / rz4 );

double rz4_x = h * (Star.v.x + vz3_x);
double rz4_y = h * (Star.v.y + vz3_y);
double rz4_z = h * (Star.v.z + vz3_z);
double vz4_x = h * EquationXz4;
double vz4_y = h * EquationYz4;
double vz4_z = h * EquationZz4;

        //zvezda na sunce
double rs4 = Math.Pow(Math.Sqrt(Math.Pow(Star.x + rs3_x, 2) + Math.Pow(Star.y +
rs3_y, 2) + Math.Pow(Star.z + rs3_z, 2)), 3);
double EquationXs4 = G * ( - Sun.m * (Star.x + rs3_x) / rs4 );
double EquationYs4 = G * ( - Sun.m * (Star.y + rs3_y) / rs4 );
double EquationZs4 = G * ( - Sun.m * (Star.z + rs3_z) / rs4 );

double rs4_x = h * (0 + vs3_x);
double rs4_y = h * (0 + vs3_y);
double rs4_z = h * (0 + vs3_z);
double vs4_x = h * EquationXs4;
double vs4_y = h * EquationYs4;
double vs4_z = h * EquationZs4;

```

```
// ***** konacni koeficijenti i pomeraj *****
```

```
//sunce na zvezdu
```

```
double rz_x = (rz1_x + 2*rz2_x + 2*rz3_x + rz4_x)/6;
double rz_y = (rz1_y + 2*rz2_y + 2*rz3_y + rz4_y)/6;
double rz_z = (rz1_z + 2*rz2_z + 2*rz3_z + rz4_z)/6;
double vz_x = (vz1_x + 2*vz2_x + 2*vz3_x + vz4_x)/6;
double vz_y = (vz1_y + 2*vz2_y + 2*vz3_y + vz4_y)/6;
double vz_z = (vz1_z + 2*vz2_z + 2*vz3_z + vz4_z)/6;
```

```
//zvezda na sunce
```

```
double rs_x = (rs1_x + 2*rs2_x + 2*rs3_x + rs4_x)/6;
double rs_y = (rs1_y + 2*rs2_y + 2*rs3_y + rs4_y)/6;
double rs_z = (rs1_z + 2*rs2_z + 2*rs3_z + rs4_z)/6;
double vs_x = (vs1_x + 2*vs2_x + 2*vs3_x + vs4_x)/6;
double vs_y = (vs1_y + 2*vs2_y + 2*vs3_y + vs4_y)/6;
double vs_z = (vs1_z + 2*vs2_z + 2*vs3_z + vs4_z)/6;
```

```
//zvezda
```

```
Star.x += rz_x;
Star.y += rz_y;
Star.z += rz_z;
Star.v.x += vz_x;
Star.v.y += vz_y;
Star.v.z += vz_z;
```

```
//sunce
```

```
Sun.v.x += vs_x;
Sun.v.y += vs_y;
Sun.v.z += vs_z;
Sun.x = rs_x;
Sun.y = rs_y;
Sun.z = rs_z;
```

```
//konacni položaji
```

```
Star.x -= Sun.x;
Star.y -= Sun.y;
Star.z -= Sun.z;
```

```
Sun.x = 0;
```

```
Sun.y = 0;
```

```
Sun.z = 0;
```

```
// vreme
```

```
Star.t += h;
```

```

//Console.WriteLine("{0}", Star.x);

return Star;

}

#endregion

#region Neptune coordinates

MassiveParticle GetNewResCoo(MassiveParticle Planet)
{
    //metod, kretanje Neptuna, i vraca koordinate
    Planet.tanom += Math.PI/50;
    Planet.r = 20;
    Planet.x = Planet.r*Math.Cos(Planet.tanom);
    Planet.y = Planet.r*Math.Sin(Planet.tanom);

    return Planet;
}
#endregion

#region Atan2

double Arctan2 (double singamma, double cosgamma)
{
    double atan2 = 0;
    double atn = 0;
    if (cosgamma == 0)
    {
        if (singamma == 0)
        {
            atan2 = 0;
        }
        else if (singamma < 0)
        {
            atan2 = 4.7123889803846899;
        }
        else if (singamma > 0)
        {
            atan2 = 1.5707963267948966;
        }
    }
    else
    {
        atn = Math.Atan( singamma / cosgamma );
        if( cosgamma < 0 )
        {
            atn += Math.PI;
        }
    }
}

```

```
    }
    else if ( cosgamma > 0 && singamma < 0)
    {
        atan += 2 * Math.PI;
    }
    atan2 = atan;
}
return atan2;
}

#endif
```

UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

Redni broj:

RBR

Identifikacioni broj:

IBR

Tip dokumentacije:

TD

Tip zapisa:

TZ

Vrsta rada:

VR

Autor:

AU

Mentor:

MN

Naslov rada:

NR

Jezik publikacije:

JP

Jezik izvoda:

JI

Zemlja publikovanja:

ZP

Uže geografsko područje:

UGP

Godina:

GO

Izdavač:

IZ

Mesto i adresa:

MA

Fizički opis rada:

FO

Naučna oblast:

NO

Naučna disciplina:

ND

Predmetna odrednica/ ključne reči:

PO

UDK

Čuva se:

ČU

Važna napomena:

VN

Izvod:

IZ

Datum odbrane:

DO

Članovi komisije:

KO

Monografska dokumentacija

Tekstualni štampani materijal

Diplomski rad

Bojan Sić

Prof. dr Slobodan Ninković

Perturbacije i zarobljavanje kometskih objekata zvezdanim prolaskom i uticaj na planetarni sistem
srpski (latinica)

srpski/engleski

Srbija

Vojvodina

2009

Autorski reprint

Prirodno-matematički fakultet, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad

Poglavlja: 11, strana: 78, slika:22.

Astronomija

Formiranje Sunčevog sistema

Formiranje Sunčevog sistema, bliski zvezdani prolazak, Kajperov pojas, Ortov oblak, protoplanetarni disk, poreklo vode na Zemlji,

Biblioteka departmana za fiziku, PMF-a u Novom Sadu

nema

Numerički je simuliran bliski zvezdani prolazak, i istražen je njegov uticaj na formiranje Kajperovog pojasa, Ortovog oblaka, i uticaj na unutrašnji planetarni sistem.

30.06.2009.

Svetlana Lukić, Tijana Prodanović, Slobodan Ninković

Predsednik: dr. Svetlana Lukić, redovan profesor PMF, Novi Sad
član: dr. Slobodan Ninković, vanredni profesor PMF, Novi Sad, mentor
član: dr. Tijana Prodanović, docent PMF, Novi Sad

UNIVERSITY OF NOVI SAD
FACULTY OF SCIENCE AND MATHEMATICS

KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number:

ANO

Identification number:

INO

Document type:

DT

Type of record:

TR

Content code:

CC

Author:

AU

Mentor/comentor:

MN

Title:

TI

Language of text:

LT

Language of abstract:

LA

Country of publication:

CP

Locality of publication:

LP

Publication year:

PY

Publisher:

PU

Publication place:

PP

Physical description:

PD

Scientific field:

SF

Scientific discipline:

SD

Subject/ Key words:

SKW

UC

Holding data:

HD

Note:

N

Abstract:

AB

Monograph publication

Textual printed material

Final paper

Bojan Sič

Prof. dr Slobodan Ninković

Perturbations and capture of comets by a stellar encounter and its effect on the Solar system

Serbian (Latin)

English

Serbia

Vojvodina

2009

Author's reprint

Faculty of Science and Mathematics, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad

Chapter: 11, pages: 78, pictures: 22

Astronomy

Formation of the Solar system

Formation of the Solar system, close stellar encounter, Kuiper belt, Oort cloud, protoplanetary disk, origin of the water on the Earth

Library of Department of Physics, Trg Dositeja Obradovića 4

none

A close stellar encounter is numerically simulated, and its influence on the formation of the Kuiper belt, the Oort cloud and the inner planetary system is investigated.

30.06.2009.

DE

Thesis defend board:

DB

President: Svetlana Lukić, Tijana Prodanović, Slobodan Ninković

President: Svetlana Lukić, Ph. D., full professor, "Faculty of Natural Sciences –

Member:

Department of Physics “, Novi Sad
Slobodan Ninković, associated professor , “ Faculty of Natural Sciences –
Department of Physics “, Novi Sad, supervisor
Tijana Prodanović, assistant professor , “ Faculty of Natural Sciences –
Department of Physics “, Novi Sad

Member:

