
Mihailo Čubrović

Evolucija dvojnih asteroida bliskih Zemlji

I. Povezanost dvojne prirode i fizičkih karakteristika sa orbitalnom evolucijom

Ovo je prvi u seriji radova o evoluciji dvojnih asteroida bliskih Zemlji i bavi se pitanjem korelacije dvojnosti i fizičkih karakteristika dvojnog sistema sa njegovim orbitalnim karakteristikama. Numeričkim simulacijama je testirana hipoteza, proistekla iz posmatračkih podataka, po kojoj populacija asteroida bliskih Zemlji sadrži veći udeo dvojnih asteroida nego ostatak asteroidnog pojasa. Takođe su istraženi tipični procesi i događaji koji dovode do formiranja različitih tipova dvojnih asteroida bliskih Zemlji, kao i zastupljenost ovih tipova među grupama asteroida sa različitim orbitalnim elementima. Praćenje orbitalne evolucije i evolucije fizičkih karakteristika je vršeno simultano, u okviru iste integracije. Orbitalna evolucija je simulirana korišćenjem simplektičkog integratora drugog reda, zasnovanog na klasičnom konceptu "mešanih" promenljivih (MVS) i optimizovanog za bliske prolaskе, pri čemu su semianalitičkim pristupom uključeni i dinamički poremećaji dvojnih sistema, kao i efekat Jarkovskog. Fizička evolucija pod dejstvom plimskih sila i sudara simulirana je novim modelom koji kombinuje hidrodinamički pristup i pristup N tela. Rezultati pokazuju tipične evolucione putanje nekoliko tipova asteroida: kontaktnih dvojnih sistema, razdvojenih dvojnih sistema, asteroida sa satelitom i brzih rotatora. Sistemi sa sporom rotacijom (slični Tutatisu) nisu detektovani, što sugeriše moguće kometsko, ili na drugi način specifično kosmogonsko poreklo ovakvih asteroida, mada se ne mogu odbaciti ni druge mogućnosti. Kratak interval integracije i mali uzorak čine navedene zaključke u određenoj meri nepouzdanim, pa se zbog toga planiraju detaljnije i preciznije simulacije orbitalne i fizičke evolucije ovakvih asteroida.

1. Uvod

Istraživanja evolucije asteroidnog pojasa zanimljiva su kako zbog samih asteroida i njihovih osobina, tako i zbog njihove povezanosti sa nas-tankom i razvojem Sunčevog sistema kao celine. Kao što je poznato, pri-roda asteroida se, prema sadašnjim saznanjima, ne razlikuje u velikoj meri od planetozimala, što ih čini privlačnim objektom proučavanja skoro svih oblasti moderne planetologije. Razdvajanje kosmogonskih uticaja od uti-

Mihailo Čubrović
(1985), Beograd,
Miroslava Jovanovića
7/2, učenik 2. razreda
Matematičke
gimnazije u Beogradu

caja kasnijih evolutivnih procesa svakako je jedan od važnih zadataka u ovoj oblasti. Najnovija istraživanja pokazuju sve veći uticaj kasnijih evolutivnih procesa na asteroidni pojas i dozvoljavaju sve širi interval početnih, kosmogonskih pretpostavki (npr. Boss 1996). Pojas asteroida bliskih Zemlji (engl. Near Earth Asteroids, u daljem tekstu NEA) predstavlja posebno važan deo asteroidne populacije, kako zbog složenog porekla, tako i zbog povećane dostupnosti posmatranjima (u odnosu na asteroide glavnog pojasa).

Fizička evolucija asteroida uopšte, a posebno NEA objekata, je relativno slabo istražena, delom zbog mnogobrojnosti i složenosti procesa koji se moraju uzeti u obzir, a delom i zbog nejasne prirode fizičke strukture asteroida. Naime, tek relativno skoro je postavljena hipoteza o asteroidima kao skoro isključivo gravitaciono vezanim aglomeratima (engl. rubble-pile). Jedan od glavnih priloga ovoj tezi je odsustvo velikih asteroida sa brzom rotacijom. Zapravo, raspodela asteroida po brzinama rotacije, izračunata iz posmatranja, ima nagli prekid upravo na teorijski predviđenoj maksimalnoj brzini rotacije za gravitaciono vezane aglomerate (Harris 1996). Hipoteza o ovakvoj strukturi asteroida danas je uglavnom opšte prihvaćena, uz neke retke izuzetke (npr. Efroimsky 2000). Malobrojna dosadašnja istraživanja o sudarnoj i plimskoj evoluciji asteroida koriste ovu hipotezu, opisujući asteroid ili kao sistem tela (Solem & Hills 1996; Leinhardt, Richardson & Quinn 2000) ili korišćenjem hidrodinamičkih metoda kao što je tzv. "glatka" čestična hidrodinamika (engl. Smoothed Particle Hydrodynamics, u daljem tekstu SPH); ovde spadaju pre svega radovi Lava i Arensa (Love & Ahrens 1996a, b), kao i Ričardsona i Botkea (Richardson & Bottke 1996; Richardson 2001; Richardson, Bottke & Love 1998). U poslednje vreme pojavljuju se i radovi koji uključuju kako gravitaciju, tako i kohezivne sile (Michel *et al.* 2002). Njihovi rezultati doprineli su poznavanju nekih tipičnih objekata, kao što su kontaktni dvojni sistemi i brzi rotatori. Početni uslovi sudara ili bliskog prolaska, kao što su relativna brzina i ugao (kod bliskih prolazaka parametar sudara), obično se određuju iz grubih teorijskih raspodela ili se čak smatraju potpuno uniformno raspoređenim u faznom prostoru. Laboratorijski eksperimenti sudarnih procesa (npr. Michel, Froeschl & Farinella 1996; prema: Benz & Asphaug 1999) takođe imaju svoje mesto, ali se pri tome pojavljuje problem skaliranja veličina koji još nije zadovoljavajuće rešen.

Orbitalna evolucija asteroida je daleko bolje istražena. Ovde jednu od najzanimljivijih pojava predstavlja tzv. stabilni kaos (mada se pod ovim terminom često podrazumevaju vrlo različiti pojmovi, pa i oni koji se nikako ne mogu svesti pod tu odrednicu). Napredni metodi nebeske mehanike, kako numerički, tako i analitički, doveli su do veoma detaljnih modela asteroidne populacije (v. npr. odličnu diskusiju u Duncan & Quinn

1993). Haotični karakter evolucije NEA, izražen kod ovih asteroida još više nego u glavnom pojasu, onemogućava direktno praćenje njihovih kretanja na velikim vremenskim skalama. Ipak, do sada je razvijeno nekoliko relativno pouzdanih modela NEA populacije (Rabinowitz 1993; Rabinowitz *et al.* 1994; Bottke *et al.* 2002). Svi navedeni radovi ukazuju na rezonance, pre svega 3:1 i ν_6 , kao na glavne izvore NEA, ali se ni populacija asteroida koji seku orbitu Marsa (engl. Mars crossers, u daljem tekstu MC) ne može zanemariti.

U ovom radu su izloženi rezultati numeričke simulacije kako orbitalne, tako i fizičke evolucije NEA, sa posebnim naglaskom na formiranje i karakteristike dvojnih sistema. Dakle, osnovni doprinos ovog projekta je simultano praćenje kretanja asteroida i njihovih fizičkih osobina. Jedan od glavnih motiva ovog istraživanja je objašnjenje posmatračkih nalaza, prema kojima NEA asteroidi sadrže znatno veći procenat dvojnih sistema (i drugih zanimljivih objekata sa burnom evolucijom) nego ostatak populacije asteroida (npr. Margot *et al.* 2002). Zbog bliskih susreta – kako međusobnih, tako i sa Zemljom – NEA bivaju izloženi čestim i jakim poremećajima, koji se manifestuju kako perturbacijama orbite oko Sunca, tako i deformacijama i eventualno raspadom pod dejstvom plimskih sila. Kod dvojnih sistema dolazi i do perturbacija kretanja komponenata oko zajedničkog centra mase. Sudari takođe moraju biti uzeti u obzir. Svi navedeni događaji i uticaji su međusobno povezani pa se može očekivati da simulacija evolucije asteroidnog pojasa koja istovremeno prati i orbitalnu i fizičku evoluciju, bolje nego tradicionalni pristup, rasvetli pre svega posmatrani veliki procenat dvojnih sistema među NEA asteroidima, kao i da ukaže na evolutivne procese koji dovode do nekih neobičnih tipova asteroida, kao što su npr. kontaktni sistemi, ili brzi rotatori, kao što je 2000 PH5.

Glavni problem ovakvog pristupa je velika količina proračuna koji se moraju izvršiti, s obzirom da se istovremeno prate dva odvojena procesa. Osim toga, broj čestica mora da bude dovoljno veliki s obzirom da su rezultati simulacije statističke prirode. Interval integracije takođe ne sme da bude previše kratak da bi mogli da dođu do izražaja relativno slabi uticaji čije se posledice zapažaju tek na velikim vremenskim skalama. Kako rezultati imaju kvalitativni karakter, kod svih primenjenih metoda se insistiralo na brzini, pre nego na preciznosti. Korišćenjem relativno novih, efikasnih tehnika, kao što su simplektički integratori i metod hijerarhijskog drveća (engl. Hierarchical Tree Method, u daljem tekstu HTM), na personalnom računaru je izvršena simulacija koja bi, korišćenjem standardnih integratora i numeričkih tehnika, zahtevala superračunare specijalizovane isključivo za simulacije N tela ili hidrodinamiku. Konačno, veoma je važno napomenuti da, iz mnogih razloga (mala preciznost, nepouzdan početni uslovi, mali uzorak), ova simulacija ne predstavlja nikakav model

populacije NEA niti daje precizno predviđanje evolucije bilo kog objekta, već daje samo kvalitativnu sliku tipičnih evolutivnih procesa i ukazuje na neke tipične proizvode evolucije.

U ovom projektu simulacija je vršena za vremenski interval od 10 miliona godina. Iz teorijskih i praktičnih razloga nije bilo moguće uraditi simulaciju za duži interval. Naime, osim očiglednog razloga da vreme potrebno za proračune postaje predugo, pojavljuje se i problem gubitka predvidivosti zbog haotičnog karaktera orbitalne evolucije. Zbog toga je ispitana i stabilnost dobijenih konačnih ishoda evolucije. Gde god je bilo moguće, ukazano je i na eventualne implikacije na modele formiranja Sunčevog sistema.

U drugom odeljku izložen je metod korišćen za integraciju kretanja asteroida, a date su i napomene o metodima korišćenim za proučavanje njihove stabilnosti. U trećem odeljku je objašnjen postupak kojim su uključeni negravitacioni uticaji (efekat Jarkovskog). U četvrtom odeljku je razmotrena evolucija kretanja komponenata dvojnog sistema oko zajedničkog centra mase, a u petom odeljku je dat hidrodinamički model asteroida, kojim je modelirano i formiranje dvojnih sistema pri sudarima i raspadima asteroida. U šestom odeljku je opisan sistem čija je evolucija simulirana, kao i početni uslovi simulacije. U sedmom odeljku dati su najvažniji rezultati simulacija i neka zapažanja u vezi sa njima, a u osmom glavne prednosti i glavni nedostaci korišćenih metoda i modela, kao i neka razmatranja vezana za buduća istraživanja u ovom polju. U devetom odeljku dati su zaključci koji se mogu izvesti iz dobijenih rezultata, pre svega najtipičnije putanje evolucije NEA asteroida, sa posebnim osvrtom na formiranje dvojnih sistema.

2. Orbitalna evolucija

Osnovni zahtev koji je u ovoj simulaciji postavljen pred integrator je brzina, a ne preciznost. Kao što je rečeno u uvodu, orbitalna evolucija je ispitivana samo sa kvalitativnog stanovišta. Za praćenje opštih karakteristika orbite pokazale su se dovoljnim relativno grube procene orbitalnih elemenata. Sa druge strane, relativno veliki broj čestica i dug vremenski interval integracije nametnuli su zahtev za velikom efikasnošću integratora. Kao najpogodniji metod u ovakvim slučajevima, iskorišćeno je simplektičko mapiranje. Kao što je poznato, ovaj pristup je po pitanju brzine u većini slučajeva superioran u odnosu na klasične metode kao što je npr. Bulirš-Štoerov (Bulirsch-Stoer), dok se preciznost, uprkos velikoj formalnoj grešci (drugog reda), može učiniti uporedivom sa preciznošću klasičnih metoda uvođenjem nekih nestandardnih tehnika, npr. "zagrevanja" (engl. warm-up) ili iteracija, kao i uvođenjem adaptivnog koraka, čime je integrator drugog reda učinjen dovoljno preciznim za potrebe ovog istraživanja.

Algoritam korišćenog integratora oslanja se na pristup uveden u ranim Vizdomovim radovima (npr. Wisdom 1982; prema: Wisdom & Holman 1992), a uopšten tokom devedesetih godina (Wisdom & Holman 1992), poznat kao simplektički integrator “mešanih promenljivih” (engl. mixed-variable symplectic – MVS). U cilju poboljšanja preciznosti, iskorišćene su neke ideje iznesene od strane Sahe i Tremeina (Saha & Tremaine 1992; Saha & Tremaine 1994), generalizovane tako da omogućavaju smanjenje koraka u slučaju bliskog prolaza. Kako se detaljne informacije o ovom tipu simplektičkih algoritama mogu naći u pomenutim referencama, ovde će biti navedene samo najvažnije osobine, uz osvrt na izmene originalnog pristupa navedenih autora.

Integracijom su obuhvaćene četiri planete – Zemlja (čijoj je masi dodata Mesečeva masa), Mars, Jupiter i Saturn. Masa Merkura je dodata masi Sunca. Asteroidi su tretirani kao “čestice bez mase” (engl. test particles), tj. zanemaren je njihov gravitacioni uticaj na kretanje drugih tela u sistemu. Hamiltonijan sistema je mapiran kao Keplerov hamiltonijan na koji deluju sekularni poremećaji:

$$H_{\text{Map}} = H_{\text{Kep}} + \Phi(t) H_{\text{Pert}} \quad (1)$$

gde hamiltonijani sa desne strane odgovaraju, redom, Keplerovom kretanju planeta i poremećajima prouzrokovanim interakcijom planeta (međusobnom i sa drugim telima). Poremećaji su tretirani kao periodični priraštaji, definisani funkcijom $\Phi(t)$ koja se može formalno zapisati kao suma δ funkcija raspoređenih na jednakim intervalima.

Ovakvo tretiranje hamiltonijana poremećaja pruža veliku efikasnost integracije, zahvaljujući lokalnoj integrabilnosti δ funkcija. Integracija se na taj način svodi na naizmenično pomeranje čestica po Keplerovoj orbiti, i modifikaciju njihovih impulsa kao posledicu interakcije sa planetama. Mada je stabilnost ovakvog postupka diskutabilna, dosadašnja istraživanja po ovom pitanju (Wisdom & Holman 1992; Holman & Wisdom 1993) ukazuju da se veće nestabilnosti mogu predvideti i izbeći pogodnim odabirom frekvencije mapiranja, dok se manji efekti na nivou preciznosti integracija vršenih u ovom projektu mogu zanemariti. Ceo sistem je integraljen u kartezijanskim koordinatama. Greška ovakvog integratora iznosi $O(\epsilon \tau^2)$, gde je ϵ odnos mase planeta (i asteroida) i mase Sunca, a τ korak integracije (ibid.). U skladu sa preporukom Sahe i Tremeina (Saha & Tremaine 1994) za svako telo je korišćen korak različite veličine, što čini integraciju efikasnijom i tačnijom. Kao metod optimizacije integratora, primenjeno je “zagrevanje” integratora (Saha & Tremaine 1992; Saha & Tremaine 1994). Osnovna ideja se sastoji u zapažanju da razlika stvarnog hamiltonijana i hamiltonijana H_{Map} ne sadrži sekularne članove linearne po ϵ , tako da se pogodnim početkom integracije greška može smanjiti na $O(\epsilon \tau^2)$ uz neznatne gubitke na brzini. Detalji se mogu naći u navedenoj referenci.

Za razliku od originalnog pristupa navedenih autora, korak svakog objekta nije fiksiran, već je smanjivan u slučaju bliskog prolaza. Kao što je poznato, ovi događaji predstavljaju veliki problem za simplektičke integratore, s obzirom da uvode relativno velike greške ne samo u položaju, već i u energiji, što narušava njihovo osnovno svojstvo (simplektički integratori bi trebalo da identički zadovoljavaju zakon energije). Treba reći da se ovde, u strogom smislu, ne radi o pravom adaptivnom koraku. Naime, u funkciju $\Phi(t)$ uvedeni su članovi viših frekvencija, čiji koeficijenti postaju različiti od nule samo u slučaju da je rastojanje od planete manje od određenog graničnog rastojanja, koje se relativno lako može proceniti numeričkim eksperimentima. Sličan pristup iskorišćen je u tzv. Symba integratoru (Duncan, Levison & Lee 1998), ali je ovaj jednostavniji i bliži originalnoj koncepciji Vizdoma i Holmena.

Kao što se vidi, negravitacione sile ovde nisu uzete u obzir. Glavni razlog je činjenica da se sistem u kome neke sile eksplicitno zavise od brzine ne može mapirati u obliku (1). Osim toga, većina dosadašnjih saznanja (npr. Vokrouhlick & Brož 1999; Breiter & Jackson 1998) ukazuje da su ovakvi efekti kod čestica većih od meteoroida skoro zanemarljivi, osim u određenim specijalnim slučajevima ili za relativno duge vremenske intervale. Zbog toga je uticaj negravitacionih sila modeliran dodavanjem određenih poremećaja brzini i koordinatama pojedinih asteroida, na osnovu nekih do sada objavljenih semianalitičkih rezultata. Informacije o ovom postupku su date u sledećem odeljku.

Za računanje Ljapunovljevih eksponenata (u izlaganju rezultata umešto eksponenata su navedena Ljapunovljeva vremena, koja su intuitivno jasnija) primenjen je, kao i za integraciju orbita, simplektički pristup, koji koristi činjenicu da je sistem hamiltonski i tako izbegava mnoge složene numeričke procedure koje su u opštem slučaju neophodne, pre svega re-normalizaciju. Korišćeni metod oslanja se pre svega na postupak koji su predložili Habib i Rain (Habib & Ryne 1994). Treba odmah napomenuti da su eksponenti Ljapunova u ovom radu korišćeni samo kao ilustracija stabilnosti (ili nestabilnosti) pojedinih grupa objekata, i da nisu računati za sve čestice niti im je posvećena velika pažnja. Zbog toga će opis ovog metoda biti ograničen na sasvim kratku napomenu. Osnovna ideja se sastoji u korišćenju eksponencijalnog zapisa simplektičke matrice koja mapira sistem u stanje u kome se nalazi posle određenog vremenskog intervala. Tako se računanje Ljapunovljevog eksponenta svodi na određivanje jednog skalarnog koeficijenta rešavanjem diferencijalne jednačine prvog reda.

3. Negravitacioni uticaji

Iako se negravitacioni uticaji tradicionalno smatraju značajnim tek kod tela dimenzija reda veličine 100 m, na velikim vremenskim skalama oni, bar teorijski, mogu izazvati nezanemarljive promene orbitalnih ele-

menata tela prečnika do oko 100 km (Vokrouhlicky 1999), dovoljne da, u haotičnim uslovima kakvi vladaju u blizini rezonanci, dovedu do transfera u pojas NEA.

S obzirom da Pointing-Robertsonov (Poynting-Robertson) efekat (i pritisak svetlosti, koji se obično tretira zajedno sa ovim efektom) postaje značajan tek kod tela centimetarskih dimenzija (npr. Breiter & Jackson 1998), razmatran je samo efekat Jarkovskog. Iako danas postoje veoma napredni modeli sile Jarkovskog, ovde je usvojen linearni model koji je izložio Vokrulicki (Vokrouhlicky 1999), a koji, u rasponu relevantnih parametara koji uglavnom pokriva vrednosti prisutne u ovoj simulaciji, daje rezultate bliske složenijim modelima (Vokrouhlicky & Brož 1999). I ovde ćemo se ograničiti samo na kratke napomene i uputiti čitaoca koga interesuju detalji na originalni članak.

Asteroid se u ovom modelu tretira kao sferno telo, homogene gustine i toplotne provodljivosti. Na taj način, raspodela temperature u unutrašnjosti asteroida je sfernosimetrična, i zavisi jedino od osunčanosti. Nerealnost ovakvog modela je očigledna ali, kao što je napomenuto, njegova predviđanja kvantitativno se mnogo ne razlikuju od rezultata daleko detaljnijih simulacija, što je potvrđeno i posebnim numeričkim eksperimentima izvršenim sa različitim objektima koji se pojavljuju u ovoj simulaciji. Diurnalni i sezonski efekat nisu razdvojeni na uobičajeni način, već je korišćen pristup Vokrulickog (Vokrouhlicky 1999) u kojima figurišu i mešoviti članovi, tj. članovi koji sadrže kako orbitalnu frekvenciju, tako i period rotacije oko sopstvene ose.

Uticaj efekta Jarkovskog je u simulaciji, kao što je uobičajeno, sveden na drift velike poluose, pošto je uticaj na ostale orbitalne elemente uglavnom zanemarljiv. Izraz za ovu veličinu je preuzet iz navedenog članka Vokrulickog (ibid.). Komplikovani članovi koji sadrže Beselove funkcije orbitalnih elemenata su izračunati u potrebnom intervalu vrednosti i u toku simulacije interpolirani, u cilju dobitka na brzini. Jedini fizički parametri asteroida koji figurišu u ovim izrazima su period rotacije, gustina, toplotni kapacitet i toplotna provodljivost. Prva dva parametra su u toku simulacije karakterisala svaki asteroid (v. šesti odeljak), dok su druga dva, izračunata iz parametara korišćene jednačine stanja (v. peti odeljak), bila identična za sve asteroide.

4. Dinamički model dvojnih sistema i njihove evolucije

Evolucija kretanja komponenata dvojnog asteroida je jedan od najzanimljivijih i najtežih problema nebeske mehanike zbog mnoštva efekata koje treba uzeti u obzir. Bliski susreti sa planetama čine ovaj problem još komplikovanim. Međutim, dosadašnja istraživanja, kao i numerički eksperimen-

menti izvršeni tokom rada na ovoj simulaciji pokazali su da relativno grube aproksimacije mogu relativno dobro da opišu ovakve procese.

Svaki dvojni sistem opisan je, u dinamičkom smislu, ekscentricitetom i poluosom orbite svake od komponenata. Takođe, praćena je evolucija perioda rotacije svake od komponenata (za detaljniji opis parametara modela, v. peti i šesti odeljak; ovde su navedeni samo oni parametri koji trpe promene zbog plimskih dejstava i drugih dinamičkih efekata). Najizraženiji činilac dinamičke evolucije gravitaciono vezanih sistema su, kako je poznato, plimske sile. U svakom koraku orbitalne integracije, za svaki dvojni sistem su računati priraštaji frekvencije rotacije, orbitalne frekvencije i orbitalnog ekscentriciteta za svaku od komponenata, korišćenjem analitičkih izraza navedenih u jednom relativno skorašnjem preglednom članku (Peale 1999). S obzirom da je teorija plimskih dejstava veoma dobro razvijena i pokrivena u literaturi, ovde neće biti navođeni detalji u vezi sa ovim proračunima; ovi izrazi i, uopšte, dobar opis ove oblasti može se naći u pomenutom članku.

Bliski prolazi pored planeta su tretirani semianalitički, korišćenjem ideje koju su izneli Farinella i Šovino (Farinella & Chauvineau 1993). Promena energije i ugaonog momenta sistema mogu se predstaviti kao:

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{G^2 m_p m_A}{V b^2} (-2E)^{-3/2} I \quad (2)$$

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{1}{2} \frac{\Delta E}{E} \quad (3)$$

gde m_p i m_A označavaju, redom, masu planete i ukupnu masu dvojnog sistema, dok V i b predstavljaju relativnu brzinu (planete u odnosu na asteroid) i parametar sudara (engl. impact parameter). Sa I je označen bezdimenzioni parametar koji karakteriše zavisnost poremećaja od geometrije susreta; jedini parametar dvojnog sistema koji figuriše u ovoj veličini je orbitalna frekvencija n komponenata dvojnog sistema oko zajedničkog centra mase. Analitički izraz za ovu veličinu je veoma komplikovan, a u pojedinim slučajevima i ne postoji, pa je odbačeno njeno direktno računanje pri svakom prolasku. Šovino i Farinella (ibid.) je aproksimiraju Gausovom raspodelom, oslanjajući se na Monte Karlo simulacije bliskih prolaza u rektilinearnoj aproksimaciji; njihov zaključak potvrđuje i Brunini (Brunini 1994). Ovde je, korišćenjem semianalitičke aproksimacije hiperboličnog slučaja, dobijena i utabličena raspodela parametra I po orbitalnoj frekvenciji i parametrima geometrije prolaska. Tako je pri simulaciji vršena samo linearna interpolacija dobijene tablice po svim slobodnim veličinama, čime su proračuni ubrzani, dok je preciznost bolja nego u originalnom radu Šovina i Farinele, jer se ne koristi gausijanska aproksimacija.

5. Hidrodinamički model asteroida

U ovom projektu je iskorišćen hidrokod poznat pod skraćenicom TREESPH, predložen od strane Hernkvista i Kaca (Hernquist & Katz 1989). U pitanju je kombinacija jednog hidrodinamičkog koda, već pomenute “glatke” čestične hidrodinamike (SPH) i, takođe već pomenutog, algoritma hijerarhijskog drveća (HTM). Hidrodinamički model zasnovan na ovom kodu i specifična rešenja primenjena u njegovoj implementaciji za modeliranje pojedinih događaja (npr. izbacivanje fragmenata, uticaj i evolucija intenziteta i pravca vektora rotacije, itd) biće opisani u posebnoj publikaciji; ovde je dat pregled osnovnih karakteristika modela i glavne razlike u odnosu na hidrodinamičke modele gravitaciono vezanih astetroida koje su dali drugi autori.

Metod SPH razvili su Džingold i Monegan (Gingold & Monaghan 1977; prema: Monaghan 1992), a danas je jedan od najprihvaćenijih hidrodinamičkih metoda, naročito u primenama koje na prvom mestu zahtevaju efikasnost i stabilnost, a ne preciznost. U pitanju je čestični kod zasnovan na Lagranževom formalizmu, u kome se međusobne interakcije čestica računaju integralnom interpolacijom vrednosti odgovarajućih parametara (npr. gustine, brzine, itd) ostalih čestica; naravno, u praksi integrali prelaze u interpolacione sume. Udeo koji jedna čestica ima u interakciji sa nekom drugom česticom određuje funkcija jezgra $W(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j; h(\mathbf{r}_i), h(\mathbf{r}_j))$, gde \mathbf{r}_i i \mathbf{r}_j označavaju vektore položaja pomenutih čestica, a h tzv. prostorni korak (engl. smoothing length), koji je, kao što se vidi, prostorno varijabilan, pri čemu u jezgru figurišu dve vrednosti ovog koraka, za obe čestice čija se interakcija posmatra. U idealnom slučaju, funkcija jezgra teži delta funkciji; slično delta funkciji, jezgro zadovoljava uslov normiranosti. Ovakav pristup parcijalne diferencijalne jednačine transformiše u obične, što eliminiše potrebu uvođenja mreže i ubrzava proračune. Kao funkcija jezgra, ovde je iskorišćen kubni splajn koji su predložili Monegan i Latancio (Monaghan & Lattanzio 1985), i koji se pokazao kao stabilniji od klasičnog Gausovog jezgra. Vrednost ovog splajna je jednaka nuli za $r_{ij} > 2h$, gde je $r_{ij} \equiv |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|$ (ista notacija će biti primenjena i kod razlike između čestica i i j za bilo koju veličinu). Za integraciju jednačina je iskorišćen integrator Runge-Kuta četvrtog reda sa adaptivnim korakom, uz dodatni uslov da vremenski korak ne može biti duži od $(h_i + h_j) / 2c$, gde je c brzina zvuka.

Komplikovan formalizam metoda SPH ovde ne može biti izložen u celini; detaljna izvođenja se mogu naći u pomenutom Moneganovom preglednom članku (Monaghan 1992), kao i u pomenutom radu Hernkvista i Kaca (Hernquist & Katz 1989). Osnovne jednačine čine jednačina gustine (koja zamenjuje klasični zakon kontinuiteta), jednačina kretanja, toplotna jednačina i jednačina stanja. Za jednačinu stanja uzeta je Tilotsonova

jednačina za bazalt (Tillotson 1962; prema: Benz & Asphaug 1999). Od ovih jednačina biće navedena jedino ova poslednja, s obzirom da je manje poznata i da zahteva dodatna razjašnjenja.

Osnovna ideja Tilotsonove jednačine stanja jeste razmatranje dva ekstremna slučaja u pogledu energije sistema; u ostalim slučajevima, pritisak se računa linearnom interpolacijom ovih ekstrema. Iako danas postoje znatno savršenije jednačine stanja (npr. ANEOS), Tilotsonova jednačina stanja pokazala se u većini dosadašnjih primena kao razumna aproksimacija, i postala standard u hidrokodovima koji opisuju asteroide. Za slučaj da je energija jedinice mase manja od specifične toplote počentog isparavanja ($E < E_{iv}$) pritisak iznosi:

$$P = \left(\frac{b}{1 + \frac{E}{E_0 \eta^2}} + a \right) \rho E + A \mu + B \mu^2 \quad (4)$$

Ako je ova energija veća od specifične toplote potpunog isparavanja ($E > E_{iv}$), jednačina dobija oblik:

$$P = a \rho E + \left[\frac{b \rho E}{1 + \frac{E}{E_0 \eta^2}} + A \mu \exp \left(\beta - \beta \frac{\rho_0}{\rho} \right) \right] \rho E + A \mu + B \mu^2 \cdot \exp \left[-\alpha \left(\frac{\rho_0}{\rho} - 1 \right)^2 \right] \quad (5)$$

Parametri $A, B, a, b, \alpha, \beta, E_0, E_{iv}, E_{cv}, \rho_0, \mu$ zavise od karakteristika materijala, a njihove vrednosti za bazalt mogu se naći npr. u navedenom članku. Interpolaciona priroda ove jednačine (u većini slučajeva) nametnula je i posebno tretiranje u implementaciji simulacije. Trenutna vrednost energije se prvo poredi sa vrednostima E_{iv} i E_{cv} . Ukoliko interpolacija nije potrebna, pritisak se određuje iz odgovarajuće jednačine (4 ili 5) u diskretizovanom obliku. U ostalim slučajevima se formira jednačina koja predstavlja odgovarajuću interpolaciju jednačina (4-5), koja se tek potom diskretizuje i rešava.

Korišćene jednačine identički zadovoljavaju zakon održanja mase i zakon održanja impulsa, dok toplotna jednačina ne odstupa od zakona energije više od $O(h^2)$, što je i tačnost interpolacione aproksimacije svih SPH jednačina korišćenih u ovoj simulaciji. Za gustinu čestica je uzeta gustina bazalta ($\rho = 2.7 \text{ g/cm}^3$), što za gustinu asteroida daje vrednosti oko 1.8 g/cm^3 . Čestice su raspoređene po kubnoj površinski centriranoj rešetki (rezultujuća gustina se razlikuje od teorijske gustine ove strukture zbog

konačnih dimenzija asteroida). Trenje između čestica i efekti fraktura su zanemareni zbog dobitka na brzini. Čestice su predstavljene neelastičnim sferama konačnih dimenzija.

Za optimizaciju proračuna gravitacionih dejstava iskorišćen je pomenuti algoritam hijerarhijskog drveća (Appel 1981; prema: Hernquist & Katz 1989). Osnovni princip ovih proračuna je klasični postupak “čestica-čestica”, odnosno sabiranje interakcija između svake dve čestice. Ovakvi proračuni se, kao što je poznato, u neoptimizovanom slučaju vrše u kvadratnom vremenu. Prednost korišćenja hijerarhijskog drveća je u mogućnosti da se čestice smeste u jata (engl. clusters) koja, pod određenim uslovima, zamenjuju pojedinačne čestice u proračunima gravitacionih interakcija. Koordinate i impulsi svih čestica smešteni su u strukturu drveta. Svaki čvor predstavlja jato čestica, dok su pojedinačne čestice smeštene u listovima. Rezultujuća gravitaciona sila koja deluje na datu česticu računa se prolaskom kroz celo drvo, pri čemu se rekurzivno računaju koordinate i impuls centra mase svakog jata. Jata se formiraju tako da veličina jata raste sa rastojanjem od čestice čije se gravitaciono ubrzanje računa. Tako se interakcija sa udaljenim česticama svodi na interakciju sa odgovarajućim jatima, dok se kod bližih čestica na kraju dolazi do listova drveta, odnosno do pojedinačnih čestica. Vreme potrebno za ovakve proračune zavisi od broja čestica kao $O(N \log N)$. Sličnim postupkom vršena je i pretraga za najbližim susednim česticama (engl. nearest neighbour search), koja u tradicionalnoj verziji takođe zahteva kvadratno vreme. Osim toga, uvođenje ovakvog pristupa daje hidrodinamičkom modelu i neke dobre osobine modela N tela, od kojih je osnovna ta da podela sudara/raspada na hidrodinamičku i balističku fazu više nema onakav značaj i uticaj na tok simulacije kao kod klasičnih hidrodinamičkih kodova, jer u situacijama u kojima preovlađuju balistička kretanja, deo algoritma koji koristi hijerarhijsko drveće uspešno zamenjuje algoritme N tela koji bi se inače morali posebno uključiti, kako bi zamenili hidrodinamički kod u ovoj fazi događaja (npr. Michel *et al.* 2002).

Kao jedan od najproblematičnijih aspekata ovog hidrodinamičkog modela pokazao se kriterijum za identifikaciju čestica koje posle sudara ili raspada asteroida (delimičnog ili potpunog) bivaju trajno izbačene u slobodnu orbitu. Direktno praćenje kretanja do kraja simulacije datog događaja (sudara ili bliskog prolaska) za svaku česticu koja se odvoji od površine asteroida moralo je biti odbačeno kao numerički previše zahtevno. Koncept kosmičke brzine je nepouzdan zbog nepravilnog oblika asteroida. Sa druge strane, kriterijum koji su predložili Lav i Arens (Love & Ahrens 1996a), a koji se svodi na zahtev da apsolutna vrednost gravitacione potencijalne energije bude manja od vrednosti kinetičke energije, nije sasvim pouzdan zbog oscilacija energije koje uvode jednačine metoda

SPH. Ipak, numerički eksperimenti pokazali su da je ovakav pristup u većini slučajeva dovoljno stabilan, sa čime se slažu i drugi autori (Bottke, lična komunikacija), pa je prihvaćen kao osnovni kriterijum, uz dodatni stabilizacioni postupak, utvrđen numeričkim eksperimentima. Naime, odnos potencijalne i kinetičke energije je za svaku česticu koja se odvoji od asteroida računat više puta u toku simulacije događaja (na svakih 10 minuta). U slučaju da ovaj test u dovoljnom broju uzastopnih slučajeva (četiri) dovede do istog rezultata dalja sudbina čestice se smatra određenom. U suprotnom, integracija kretanja čestice se nastavlja dok jedan od rezultata ne dostigne udeo od 80% ukupnog broja testova. U svim testovima se radi o kinetičkoj i potencijalnoj energiji u sistemu centra mase.

Kriterijum za identifikaciju satelita je morao biti pažljivije odabran, s obzirom da je identifikacija satelita jedan od osnovnih zadataka simulacije. Osim toga, ovde je bilo neophodno da se, osim proste identifikacije, odrede i orbitalni elementi tela u formiranom dvojnog sistema. Teorijski, čestice koje se odvoje od asteroida trebalo bi da zadovolje kriterijum:

$$|U_i| > T_i \geq \frac{1}{2} |U_i| \quad (6)$$

Druga nejednakost navedenog kriterijuma (ili bilo kakav sličan test) nije bila potrebna, s obzirom da je odvajanje čestica od površine asteroida moglo biti praćeno direktno (jer je hidrodinamička simulacija prekidana tek kada ovakvi događaji prođu, v. dalje u ovom i sledećem odeljku). Međutim, i dalje ostaje problem odvajanja čestica koje postaju sateliti od onih koje se (po završetku hidrodinamičke simulacije) vraćaju na asteroid, i određivanje orbite onih prvih. Direktno praćenje ovih fragmenata zahtevalo bi integraciju u intervalu od nekoliko dana, što je bilo nedopustivo zbog brzinskih zahteva. Zbog toga je uslovu (6) pridodat znatno strožiji i pouzdaniji kriterijum: kretanje asteroida u narednih pet dana je ekstrapolirano semianalitičkim modelom, korišćenjem Hilove aproksimacije (Nakazawa, Ida & Nakagawa 1989*a, b*). Rezultat ove ekstrapolacije je, slično prethodnom slučaju, prihvatlan ukoliko se složi sa kriterijumom (6), inače je integracija nastavljena još jedan sat. I ovaj kriterijum se pri numeričkim eksperimentima pokazao kao dovoljno stabilan (ponovljeni testovi bili su veoma retki). Početni orbitalni elementi novoformiranog dvojnog sistema određivani su takođe korišćenjem Hilove aproksimacije (Hasegawa & Nakazawa 1990).

Kao uslov za prekid hidrodinamičke simulacije, usvojeni su sledeći zahtevi: (1) tokom prethodnog sata nije dolazilo do sudara fragmenata većih od 50 m²; (2) sve čestice koje napuštaju asteroid su pronađene i izbačene; (3) svi sateliti su detektovani (kao i sve čestice koje su odvojene od površine prvobitnog asteroida, ali neće postati sateliti). Ovakav kriterij-

jum doveo je do simulacija u intervalima od nekoliko časova, što je znatno kraće od simulacija ovakvog tipa koje obično obuhvataju interval od nekoliko dana (Leinhardt, Richardson & Quinn 2000; Richardson, Bottke & Love 1996), pa su i rezultati nesigurniji ali, na nivou pouzdanosti ove simulacije, zadovoljavajući.

6. Simulacija

6.1 Implementacija simulatora

Simulator je implementiran u programskom jeziku/okruženju MATLAB 6.0, a izvršen na PC računaru sa 64 megabajta memorije. Kao što se vidi, zahvaljujući efikasnim algoritmima i niskoj preciznosti orbitalne integracije postignute su zadovoljavajuće performanse na relativno sporom računaru.

Kao osnovni okvir simulatora iskorišćen je integrator orbita. U određenim intervalima orbitalni elementi dobijeni integracijom su korigovani u skladu sa jednačinom promene velike poluose usled efekta Jarkovskog. Na kraju svakog koraka svaki asteroid je podvrgnut testu koji pokazuje da li će u idućem koraku početi neki događaj (sudar sa planetom, sudar sa asteroidom, bliski prolazak pored planete, bliski prolazak pored asteroida), pri čemu je kao glavni kriterijum korišćen ulazak u Hilovu sferu planete ili drugog asteroida, i evolucija kretanja unutar nje, tokom koga, kao što je poznato, može doći do nekog od navedenih događaja. U slučaju da dođe do sudara sa planetom, asteroid se izbacuje iz dalje integracije. U ostalim slučajevima, uključuje se hidrodinamički simulator, koji prati dati događaj (uključujući i kretanje centra mase asteroida, tj. njegovu orbitalnu evoluciju, zahvaljujući algoritmu TREESPH). Na početku hidrodinamičke simulacije se za dato telo vrši privremeni prelaz na koordinatni sistem vezan za centar mase asteroida (ili većeg od dva asteroida, u slučaju sudara). S obzirom na kratko trajanje ovakvih događaja, cela hidrodinamička simulacija obično bi bila završena u jednom koraku orbitalnog integratora. Treba napomenuti da algoritam detekcije sudara ne predviđa mogućnost susreta tri (ili više) tela, što u praksi nije problem zbog male verovatnoće takvih događaja. Dvojni asteroidi su obeleženi posebnom oznakom, koja je omogućila da se kod takvih asteroida pri integraciji orbitalnog kretanja periodično vrše i korekcije orbitalnih elemenata komponenata dvojnog sistema, u skladu sa jednačinama (2-3).

Ukoliko pri sudaru/raspadu dođe do odvajanja tela od prvobitnog asteroida, njegove koordinate i impulsi se iz referentnog sistema vezanog za centar mase prvobitnog asteroida prevode u Jakobijev koordinatni sistem korišćen u orbitalnom integratoru, odakle se računaju i njegovi početni orbitalni elementi. Iz zakona održanja momenta impulsa određuje se vektor

rotacije ovog tela. Dakle, ovakva tela postaju slobodne čestice koje sa dalje integrale kao i ostali asteroidi u sistemu.

Tela dimenzija manjih od 100 m su automatski izbacivana iz simulacije, osim ukoliko se radilo o satelitima asteroida. Najveći broj ovako malih tela izbačenih u slobodne orbite verovatno i ne bi bilo moguće pratiti, s obzirom da na tako malim dimenzijama, čak i po najsmelijim procenama (Love & Ahrens 1996a) glavnu ulogu imaju unutrašnje kohezione sile, čije postojanje ovde nije uzeto u obzir. Takođe su izbacivani objekti koji preseku Jupiterovu orbitu, kao i objekti čija orbita postane hiperbola.

6.2 Osnovna svojstva i početni uslovi simuliranog sistema

Izbor početnih uslova je jedan od najnepouzdanijih elemenata ovog istraživanja. Teorijski najbolje rešenje – usvajanje neke od raspodela glavnog pojasa ili čak primordijalnog asteroidnog pojasa – nije bilo ostvarljivo jer bi zahtevalo veliki broj čestica i dug interval integracije. Brzinski zahtevi ograničili su broj čestica na najviše 100–200, dok je interval integracije morao biti ograničen na red veličine 10 miliona godina ne samo iz praktičnih, već i iz teorijskih razloga (haotična priroda evolucije većine asteroida, a posebno NEA, i zahtevi za mnogo detaljnijim modelima orbitalne, pa i fizičke evolucije koji odatle slede). Tako se simulirani sistem sastojao iz 160 čestica (što je, po zaključku objavljenom u Bottke *et al.* 2002, šest puta manje od stvarne populacije), a integracija je trajala 10 miliona godina. Treba imati u vidu da su u početnom trenutku čestice bile raspoređene u regione rezonanci 3:1 i v_6 , kao i u region MC (v. dalje), tj. u regione koji predstavljaju potencijalne izvore NEA, tako da broj od 160 čestica zapravo predstavlja broj potencijalnih NEA, od kojih određen broj ostaje u početnoj oblasti faznog prostora.

Svaki asteroid okarakterisan je orbitalnim elementima, masom, vektorom rotacije i hidrodinamičkim modelom (tj. koordinatama i impulsima svake čestice u referentnom sistemu centra mase, koje određuju i ukupnu gustinu, dimenzije i oblik). U cilju lakšeg poređenja sa posmatračkim rezultatima, uveden je i srednji poluprečnik. Kod dvojnih asteroida, kretanje komponenata oko zajedničkog centra mase okarakterisano je poluprečnikom i inklinacijom orbite.

Početni uslovi simulacije preuzeti su pre svega iz nedavno objavljenog detaljnog modela populacije objekata bliskih Zemlji (engl. Near Earth Objects, u daljem tekstu NEO) Botkea i saradnika (Bottke *et al.* 2002). Početni orbitalni elementi odgovaraju regionima koji predstavljaju, kako je pomenuto u prvom odeljku, glavne izvore NEA: region rezonance 3:1, region rezonance v_6 i region MC (zapravo njegov unutrašnji deo). Komete Jupiterove familije i asteroidi spoljnog pojasa, koji po navedenom radu učestvuju u stvaranju populacije NEA sa ukupnim udelom od 14%, nisu

uzeti u obzir, jer bi njihovo uvođenje zahtevalo znatna poboljšanja integratora i, kada su u pitanju komete, razdvajanje još aktivnih od mrtvih komete, tj. kometskih asteroida (detalji se mogu naći u Harris & Bailey 1998). Početne vrednosti orbitalnih elemenata bile su identične početnim uslovima navedenih regiona u modelu Botkea i saradnika (Bottke *et al.* 2002 i tamo navedene reference). Relativne zastupljenosti navedena tri regiona iznose 0.44, 0.29 i 0.27, respektivno, i odgovaraju relativnim zastupljenostima ovih regiona u pomenutom modelu, kada se izostave region MC i region komete Jupiterove familije.

Raspodela vektora rotacije asteroida je velikim delom još uvek nerešen problem. Većina autora uopšte ne uzima u obzir rotaciju pri simulacijama njihove fizičke evolucije. Istraživanja dinamičke evolucije dvojnih asteroida pri kretanju oko zajedničkog centra mase (npr. Chauvineau & Farinella 1994), kao i istraživanja uticaja efekta Jarkovskog (npr. Vokrouhlick 1999; Vokrouhlicky & Brož 1999), u kojima orijentacija ose rotacije ima veliki značaj, podrazumevaju izotropnu distribuciju vektora rotacije. Ova praksa usvojena je i u ovoj simulaciji, mada njena opravdanost može biti veoma diskutabilna i u znatnoj meri narušiti kvalitet rezultata (v. osmi odeljak). Raspodela perioda rotacije aproksimirana je Maksvelovom distribucijom dobijenom statističkom analizom posmatračkih podataka (Farinella, Paolicchi & Zappal 1981).

Sličan problem postoji i kod raspodele oblika. Nijedno istraživanje distribucije odnosa poluosa ili bilo kakvih drugih parametara oblika nije nam poznato. Tako je izbor bio sveden na konstruisanje teorijske distribucije, ili na korišćenje posmatračkih podataka. Smatrajući prvi izbor previše obimnim i nepouzdanim poslom, odlučili smo se za drugu mogućnost. Kao izvor podataka poslužio je Upsala fotometrijski katalog asteroida (Lagerkvist *et al.* 2000). Za raspodelu prečnika iskorišćena je, danas već opšteprihvaćena, eksponencijalna raspodela (Gomes 1997).

7. Rezultati

Pre nego što se pređe na izlaganje rezultata, treba još jednom naglasiti da se, s obzirom na mali broj čestica i malu preciznost korišćenih metoda, ne može govoriti o modeliranju populacije NEA ili detaljnom praćenju njene evolucije. Svi prikazani rezultati su pre svega kvalitativne prirode, i imaju za cilj da pokažu neke tipične pojave u evoluciji ovih objekata, pre svega vezane za uticaje orbitalne evolucije na fizičku evoluciju i nastanak dvojnih sistema. Dobro slaganje pojedinih rezultata sa posmatranjima ili rezultatima ranije objavljenih detaljnijih simulacija govori u prilog smislenosti ovakvog pristupa, ali ne utiče na osnovni – opisni i kvalitativni karakter rezultata.

Sa druge strane, jasno je da jedna ovakva, relativno složena simulacija, sa mnogo parametara koji karakterišu razne komponente sistema, daje veliku količinu numeričkih rezultata i podataka. Detaljno navođenje i statistička analiza ovih rezultata, mada bi mogli da pruže korisna saznanja, takođe nisu predmet ovog istraživanja. U ovom odeljku biće navedeni samo neki karakteristični rezultati koji će pokazati neke opšte karakteristike dinamičkih i fizičkih procesa koji oblikuju evoluciju NEA, i na kojima će se bazirati zaključci izneseni u devetom odeljku.

Ponašanje simuliranog sistema u celini odgovara poznatim teorijskim predviđanjima i posmatračkim saznanjima. Procesi migracije u pojas NEA pokazuju uobičajeni sled događaja, pri čemu glavnu ulogu imaju bliski prolasci pored planeta. Najveću efikasnost pokazao je, kao što se moglo i očekivati, region rezonance 3:1, dok od preostala dva blagu prednost ima region MC, što je verovatno i posledica kratkog intervala integracije, jer sekularne rezonance predstavljaju znatno sporije tranzitne mehanizme od rezonanci srednjeg kretanja (npr. Michel & Froeschl 2000). Već posle oko 2 miliona godina došlo je do stabilizacije sistema. Uprkos kratkom Ljapunovljevom vremenu (oko 10^3 – 10^4 , u ekstremnim slučajevima oko 10^2 godina), relativno veliki broj čestica preživeo je do kraja integracije.

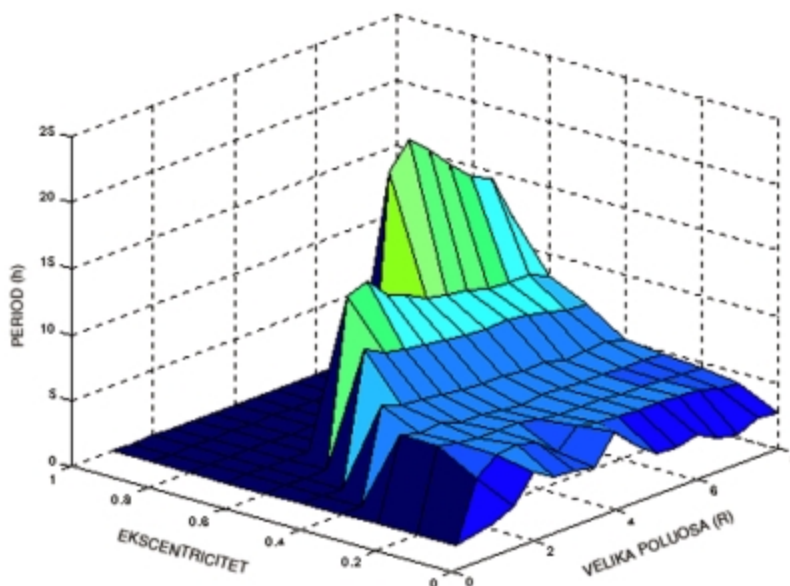
Fizičkom evolucijom asteroida upravljaju, kao što se moglo i pretpostaviti, sudari i plimski raspadi. Pri ovim događajima asteroidi prolaze kroz drastične promene, moglo bi se reći, haotične prirode, s obzirom da su početni uslovi ovakvih događaja praktično nepredvidljivi i zavisni od velikog broja faktora, dok ishod često veoma zavisi od početnih parametara.

Sudari asteroida takođe pokazuju neke dobro poznate karakteristike, opisane u ranijim radovima; dobra rekapitulacija ovih rezultata može se naći u jednom relativno novom radu (Benz & Asphaug 1999). Ishod sudara zavisi pre svega od odnosa masa i ugla sudara tela koja učestvuju pri sudaru, dok relativna brzina ima manji uticaj. Naravno, ovakva sporadična zapažanja su daleko manje pouzdana od sistematskih istraživanja uticaja različitih parametara sudara. Može se reći da je reakumulacija fragmenata u ovoj simulaciji generalno brža i jasnije korelisana sa početnim uslovima sudara nego kod drugih autora, što se delimično može objasniti boljim tretmanom gravitacionog međudejstva udaljenih fragmenata koji pruža TREESPH. Teorijska vremenska skala za formiranje aglomerata posle sudara zadovoljena je do na red veličine, mada se u tom kontekstu postavlja pitanje o ekvivalentnosti teorijskog uslova za ovaj događaj i uslova koji su u simulaciji korišćeni za prekid hidrodinamičke integracije. Donja granica prečnika neophodnog za stabilnost gravitaciono vezanih sistema kreće se za ovu simulaciju oko 100–200 m. Specifična energija katastrofalnog sudara (Q_D^* , za definiciju v. Benz & Asphaug 1999) kreće se oko 10^9 erg/g.

Plimske sile deluju relativno sporo, ali neprekidno (naravno, sa promenljivim intenzitetom), tako da predstavljaju veoma efikasan mehanizam. Spori prolasci pokazali su se kao najefikasniji mehanizmi raspada, dok brzi prolasci uglavnom kao jedini rezultat daju deformaciju asteroida. Ipak, rezultat prolaska u velikoj meri zavisi i od početnog fizičkog stanja asteroida, pa česti brzi prolasci mogu biti znatno efikasniji od “slučajnih”, povremenih sporih prolazaka. Pod dejstvom ovih sila asteroidi se postepeno deformišu i slabe, tako da do raspada često dolazi “slučajno”, tj. pod dejstvom nekog neznatnog poremećaja (ne obavezno pri bliskom prolasku). U dva slučaja je posmatran potpun raspad asteroida na veliki broj veoma malih fragmenata. U jednom od navedena dva slučaja većina formiranih fragmenata ubrzo se raspala na veći broj agregata od svega nekoliko čestica i još veći broj pojedinačnih čestica, sa upadljivo sličnim početnim orbitalnim parametrima. Dalja evolucija ovih tela nije mogla biti praćena zbog njihovih malih dimenzija, ali se može pretpostaviti da je u pitanju formiranje meteorskog potoka, s obzirom da je odavno pretpostavljeno asteroidsko poreklo pojedinih meteorskih potoka. Naravno, ovo je samo pretpostavka, čiji značaj ne treba preuveličavati.

Jedan od zanimljivijih fenomena uočenih u simulaciji je i evolucija samih dvojnih sistema. Na slici 1 može se naći prikaz konačnih fizičkih i dinamičkih karakteristika asteroida koji su prošli kroz dvojni fazu, u zavisnosti od početnih uslova dvojnog sistema – velike poluose i ekscentriciteta (up. slike 2-3 u Chauvineau & Farinella 1994). U nekim slučajevima objekti sa sličnim početnim dinamičkim parametrima doživeli su različit evolucionarni put – u tom slučaju prikazan je sistem koji se pokazao stabilniji. Naravno, ovakav prikaz je samo gruba vizualizacija – on daje samo globalne karakteristike posmatane raspodele.

Pokazalo se da konačna sudbina dvojnog sistema u velikoj meri zavisi i od evolucije kretanja oko zajedničkog centra mase. Međutim, nikakva značajnija korelacija sa orijentacijama vektora rotacije komponenata (pre svega znatno izraženija nestabilnost retrogradnih rotatora) nije zapažena, u suprotnosti sa jednom od opsežnijih studija ovih fenomena (Chauvineau & Farinella 1994). Mogući uzrok je činjenica da se veliki deo energije rotacionog kretanja u ovom modelu postepeno gubi na unutrašnje sudare čestica i njihovo zagrevanje, pa plimsko dejstvo koje, u pomenutom radu, dovodi do približavanja i sudara komponenata u slučaju retrogradne rotacije, nema veliku važnost. Najveći uticaj na ovakve procese imaju bliski prolasci pored Zemlje, pa se navedeni događaji dešavaju pre svega kod asteroida koji seku Zemljinu orbitu (engl. Earth Crossing Asteroids, u daljem tekstu ECA). Ostali aspekti dinamičke evolucije parametara dvojnog sistema kvalitativno su slični rezultatima Farinele i Šovinoa: bliski prolasci i plimske sile postepeno dovode do gubitka orbitalne energije, što se



Slika 1.
Zavisnost perioda rotacije (kod dvojnih sistema perioda rotacije primarne komponente) u časovima od početnih vrednosti velike poluose (izražene u poluprečnicima primarne komponente R) i ekscentriciteta komponenta dvojnog sistema. Prazna oblast odgovara pericentričnim udaljenostima manjim od poluprečnika primarne komponente.

Figure 1.
Dependance of rotational period (for binary systems, the rotational period of the primary component) in hours upon the initial values of the large semiaxe (in units of the primary's radius R) and eccentricity of the components. The empty area corresponds to the pericentric distances smaller than the primary's radius.

završava sudarom ili razilaženjem članova dvojnog sistema. U ovom drugom slučaju, veća komponenta gubi najveći deo momenta impulsa svoje rotacije. Međutim, kod asteroida koji približavanjem postaju kontaktni dvojni sistemi, usporenje rotacije je daleko manje izraženo nego što se očekivalo.

Vektori rotacije velike promene trpe pre svega pri sudarima. Najuočljiviji trend pri ovim promenama je postepeno smanjivanje brzine rotacije sa deformacijom asteroida, što je i razumljivo. Zapažen je i obrnut trend: asteroidi koji brže rotiraju se pri sudarima i raspadima lakše deformišu. Potpuno objašnjenje ove pojave svakako uključuje kombinovane uticaje mnogih efekata. Delimično je nejasno zbog čega dolazi do sporih promena orijentacije vektora rotacije čak i kod asteroida koji nisu doživeli sudar ili bliski prolazak. Moguće je da je u pitanju efekat plimskih sila. Međutim, ovakvo objašnjenje i dalje ostaje nepotpuno i nepouzđano.

Konačno, sledi kratak opis karakteristika i evolucionih putanja nekih tipičnih objekata, nastalih kao proizvod sudarne i/ili plimske evolucije. Kratak prikaz osnovnih karakteristika ovih objekata može se naći u tabeli 1. U tabeli su date osnovne karakteristike tipičnih objekata koji su doživeli kolizionu i/ili plimsku evoluciju: familija (Aten, Apolo ili Amor), fizičko poreklo, broj objekata na kraju simulacije, vreme života (u milionima godina), periodi rotacije i revolucije oko zajedničkog centra mase (u časovima; ovaj drugi samo kod dvojnih sistema), velika poluosa (u astronomskim jedinicama) i ekscentricitet. Oznake grupa: 1 – razdvojeni dvojni sistemi, 2- kontaktni dvojni sistemi, 3- asteroidi sa satelitima, 4 – brzi rotatori. Navedene kvantitativne veličine treba shvatiti samo kao orijentacione vrednosti.

Tabela 1. Osnovne karakteristike tipičnih objekata koji su doživeli kolizionu i/ili plimsku evoluciju

Grupa	Familija	Fizičko poreklo	N	T (Myr)	P_0 (h)	P (h)	a (AU)	e
1	sve	plimski raspad	18	1.1-4.9	4-11	14-36	0.9-1.5	0.0-0.3
2	Aten	plimski raspad i grupa I	25	1.4-7.3	9-21	$P = P_0$	1.0-1.3	0.0-0.2
3	Amor	sudari	1	0.0-1.2	6-12	17-33	1.2-1.5	0.1-0.2
4	Apolo	sudari	9	0.9-3.2	2-4	–	1.1-1.7	0.1-0.3

Kao karakteristični tipovi zapaženi su razdvojeni dvojni asteroidi (kao što je npr. 1999 KW4), kontaktni dvojni sistemi (kao što je npr. Kleopatra), brzi rotatori (kao što je npr. 2000 PH5), kao i asteroidi sa satelitima (tj. sistemi u kojima masa primarne komponente dominira nad masom sekundarne, kao što je sistem Ida-Daktil), ali je njihova stabilnost uglavnom veoma mala, pa mali broj ovakvih sistema ostaje u ovom stadijumu duže vreme. Uočljiv je nedostatak sporih rotatora, a naročito kontaktnih sistema čija je rotacija drastično usporena (kao što je npr. Tutatis). O ovom poslednjem problemu biće reči i u sledećem odeljku.

Razdvojeni dvojni asteroidi zapaženi su, kao i kontaktni dvojni sistemi, pre svega kao posledica plimskog raspada asteroida. Naravno, plimskim efektima su u najvećoj meri izloženi ECA objekti. Međutim, ovakvi asteroidi često bivaju izbačeni iz pojasa ECA, tako da se mogu naći u celom pojasu NEA. U ovakvim sistemima veliki značaj imaju i međusobne plimske sile koje, kao što je pomenuto, mogu da dovedu do sudara ili razilaženja komponenata, ili do stvaranja kontaktnog sistema. Ipak, zapaženi su i mnogi relativno stabilni sistemi ove vrste, koji su preživeli do kraja simulacije. U takvim slučajevima se pokazuje težnja ka sinhronizaciji rotacije i revolucije oko zajedničkog centra mase. Naravno, dobro je poznato da je vremenska skala ovakvih događaja mnogo duža od intervala ove simulacije (npr. Peale 1999), pa se o ovakvim procesima ovde ne može reći ništa detaljnije.

Kontaktni dvojni sistemi pokazali su se kao najstabilniji, jer u stanju sporih periodičnih oscilacija, po svemu sudeći, mogu ostati veoma dugo. Uočena su dva tipična scenarija njihovog nastanka. Prvi je već pomenuto približavanje komponenata razdvojenog dvojnog sistema; drugi je sličan formiranju razdvojenih dvojnih sistema, pri čemu su tipične brzine prolaska veće nego u prvom slučaju, pa je dejstvo plimskih sila manje. Rotacija ovakvih asteroida je u proseku sporija nego kod pojedinačnih asteroida, što je i logično. Ipak, sistemi sa periodom rotacije dužim od jednog dana su se pokazali kao relativno retki.

Brzi rotatori među pojedinačnim asteroidima primećeni su kao posledica sudara. Uglavnom nastaju pri sudaru (u kome se smer relativne brzine poklapa sa smerom rotacije), a ubrzavanje rotacije je naročito izraženo pri velikim uglovima sudara. U jednom slučaju, brzi rotator je nastao pri sudaru komponenata dvojnog sistema. Ovaj drugi scenario je, ipak, u praksi krajnje neverovatan, i može se desiti jedino neposredno posle formiranja kontaktnog dvojnog sistema, pre nego što veći deo energije rotacije bude izgubljen. Detektovani su i sudari pri kojima dolazi do raspada asteroida zbog prevelikog priraštaja momenta impulsa, pa gravitacione sile postaju nedovoljne za očuvanje asteroida. Pri formiranju brzih rotatora relativno veliki broj manjih fragmenata obično biva trajno izbačen.

Asteroidi sa satelitima su tipičan primer sudarne evolucije. Ovakvi asteroidi, sudeći po rezultatima ove simulacije, nastaju isključivo pri sudarima. Satelit se obično formira od izbačenog materijala obe komponente. U slučaju da su oba asteroida slične veličine, verovatniji ishod je brzi rotator, u slučaju da se smerovi rotacija asteroida i relativne brzine poklapaju. Ukoliko je masa jednog asteroida dominantnija u odnosu na masu drugog, uticaj vektora rotacije na ishod sudara se pokazuje kao manje važan, a broj fragmenata je manji. Konačno, kod dovoljno velikih odnosa masa, jedini ishod je formiranje kratera na većem asteroidu, pri čemu se od izbačenog materijala u pojedinim slučajevima formira mali satelit koji praktično ne utiče na dalju evoluciju primarne komponente. Treba, međutim, naglasiti izrazitu nestabilnost ovakvih sistema. Gubitak satelita je u mnogim slučajevima detektovan već posle nekoliko hiljada godina. U samo dva slučaja ovakvi sistemi su doživeli starost veću od milion godina. Ovim se može objasniti mali broj asteroida sa satelitima u pojasu NEA i njihova veća zastupljenost u glavnom pojasu: slučajni poremećaji koji lako dovode do gubitka satelita su u glavnom pojasu manje verovatni.

U nekoliko slučajeva je primećeno formiranje sporih rotatora prilikom raspada kontaktnih dvojnih sistema, koji i sami, kao što je napomenuto, uglavnom imaju relativno sporu rotaciju. Međutim, upadljiv je nedostatak sporih rotatora sa periodom dužim od jednog dana, kako među pojedinačnim, tako i među dvojnim asteroidima. Ovaj nedostatak zahteva teorijsko objašnjenje (ukoliko se ne radi o neadekvatnosti simulacije), s obzirom na sve veći broj otkrivenih ovakvih objekata. Neke pretpostavke o ovom problemu iznesene su u sledećem odeljku.

8. Diskusija

8.1 Neke moguće implikacije rezultata ovog istraživanja

Rezultati ovog istraživanja, iako kvalitativne, pa čak i demonstrativne prirode, ipak ukazuju na neke bitne karakteristike evolucije NEA asteroida i omogućavaju da se odredi značaj pojedinih procesa koji su doveli as-

teroidni pojas u stanje u kome se danas nalazi. Osnovna koncepcija – simultano, “neposredno” praćenje evolucije posmatranog sistema, pri čemu osnovni deo simulacije predstavlja integrator koji po potrebi uključuje simulatore ostalih procesa – pokazala se kao moćan metod koji daje uvid u veze između pojedinih aspekata fizičke i orbitalne evolucije kakav često nije moguće dobiti ni simulacijama izolovanih procesa (npr. simulacijama sudara u kojima se posmatraju dva izolovana tela), ni razvojem teorijskih modela. Naravno, mane ovakvog pristupa su takođe jasne – obimnost i komplikovanost proračuna, nemogućnost da se pojedini procesi obrade dovoljno detaljno, skoro nepredvidljiva propagacija grešaka (u smislu da npr. male nepreciznosti u integraciji orbita, koje praktično ne utiču na same orbitalne elemente, mogu da dovedu do velikih grešaka u proračunima plimskog uticaja prilikom bliskog prolaska), veliki broj početnih parametara i uslova, čine ovakav pristup ipak teško primenljivim. Manje obimne simulacije izolovanih procesa određene vrste ostaju najfleksibilniji i najpraktičniji način modeliranja evolucije Sunčevog sistema.

Srednje vreme života NEA u ovoj simulaciji je svega nekoliko puta duže od rezultata detaljnijih simulacija (npr. Duncan & Quinn 1993 i tamo navedene reference), koje, uz to, obično isključuju iz dalje integracije svaku česticu koja doživi sudar ili bliski prolazak, pa se može tvrditi da se ovaj rezultat poklapa sa dosadašnjim saznanjima. On takođe donekle potvrđuje korelaciju između Ljapunovljevog vremena i stvarnog vremena života (engl. event time) asteroida koju su uočili Frenklin i saradnici (Franklin, Lecar & Murison 1993; Murison, Lecar & Franklin 1994). Međutim, neophodno je naglasiti da uočavanje ovog poklapanja ne znači i naše slaganje sa njihovim, po našem mišljenju, previše smelim zaključcima.

Proces migracije iz glavnog pojasa u pojas NEA je bio predmet mnogih znatno detaljnijih studija, pa se ovom prilikom o njemu ne može reći ništa suštinski novo. Značaj uloge negravitacionih efekata u ovom procesu je donekle nejasan, a pri pisanju ove simulacije možda i potcenjen previše jednostavnim modelom efekta Jarkovskog i izostavljanjem Pointing-Robertsonovog efekta. Ipak, s obzirom da negravitacione sile kod većih objekata sve više slabe u odnosu na gravitacione, može se pretpostaviti da ovaj nedostatak nije previše uticao na rezultate. Takođe je važno napomenuti da su ovde, na početku simulacije, posmatrani objekti koji su već došli u regione koji predstavljaju izvore NEA, tako da uloga efekta Jarkovskog u migriranju objekata u rezonance, koja je obično naglašavana, ovde nije od većeg značaja.

Dinamička evolucija dvojnih asteroida pokazuje izvesnu, bar kvalitativnu, sličnost sa rezultatima Šovinoa i Farinele (Chauvineau & Farinella 1994), osim već pomenutog izuzetka u vezi sa uticajem orijentacije ose rotacije (i, posebno, uticaja retrogradne rotacije), čiji presudni uticaj na evoluciju dvojnog sistema nije potvrđen. Detaljnije tretiranje plimskih sila

i sudara u ovom istraživanju doprinelo je boljem razumevanju mehanizma stvaranja kontaktnih sistema, ali su Šovino i Farinela koristili donekle precizniji dinamički model dvojnog sistema, što je važna prednost njihovog istraživanja.

Procena praga Q_D^* , iako gruba i nepouzdana, ide u prilog sve prisutnijim tvrdnjama o većoj izdržljivosti gravitaciono vezanih asteroida. Minimalni prečnik gravitacionih aglomerata se približno slaže sa rezultatima novijih simulacija (Love & Ahrens 1996a; Benz & Asphaug 1999), koji su spustili znatno niže granicu koja je svojevremeno postavljana na nekoliko kilometara. Jedna od posledica ovako niskog praga dominacije gravitacije takođe objašnjava česta neslaganja laboratorijskih eksperimenata sa posmatranjima.

Neprekidno stvaranje malih udarnih fragmenata pri sudarima, koji skoro uvek bivaju izbačeni u slobodnu orbitu, u kombinaciji sa fragmenatima koji bivaju izbačeni prilikom plimskih raspada, moglo bi da objasni višak malih asteroida u pojasu ECA zapažen u nekoliko dosadašnjih istraživanja (Michel & Froeschl 2000; Rabinowitz 1993; Rabinowitz 1997). Sličan mehanizam bi mogao da dovede do povremenog formiranja meteoroidnih rojeva. Ipak, ovo pitanje zahteva znatno detaljnije istraživanje, pri čemu se u obzir mora uzeti i veliki značaj negravitacionih efekata.

Priroda sudara u nekim slučajevima izgleda nešto drugačije nego kod ranijih autora. Dok Lajnhart i saradnici (Leinhardt, Richardson & Quinn 2000) zapažaju izraženu zavisnost ishoda sudara od intenziteta relativne brzine tela, u ovoj simulaciji je primećena relativno slaba korelacija. Formiranje dvojnih sistema pri sudarima se pokazalo kao ograničeno na formiranje relativno malih satelita, dok Mišel i saradnici (Michel *et al.* 2002) uočavaju znatno širi spektar različitih dvojnih sistema nastalih pri sudarima.

U celini gledano, plimske sile su se u ovom istraživanju pokazale kao značajniji faktor formiranja dvojnih sistema i fizičke evolucije uopšte nego što većina dosadašnjih studija pokazuje. Ovo je direktna posledica ispitivanja sudara/raspada u realnim uslovima, ali se ne može zanemariti ni činjenica da korišćeni model verovatno bolje opisuje dejstvo plimskih sila nego sudare, koji zahtevaju veću rezoluciju, bolji tretman udarnih talasa, pa i uvođenje trenja i fraktura. Efekte odsustva trenja u korišćenom modelu je teško proceniti: sa jedne strane, kod malih deformacija, odsustvo trenja olakšava nastajanje gravitacionih deformacija; sa druge strane, odsustvo trenja kod velikih deformacija smanjuje maksimalnu deformaciju koju asteroid može da izdrži bez raspada. Jedini objekti kod kojih su se plimske sile pokazale manje efikasnim nego u ranijim istraživanjima (Richardson & Bottke 2001) su brzi rotatori: u ovoj simulaciji nije detektovan nijedan ovakav objekat formiran usled plimskih dejstava, već su kao jedini mehanizam zapaženi sudari.

Najintrigantniji rezultat ove simulacije verovatno je nedostatak sporih rotatora Tutatisovog tipa, pa i sporih rotatora uopšte. Trenutno nismo u mogućnosti da damo nikakvo pouzdanije tumačenje ovog nedostatka. U literaturi takođe nismo naišli na bilo kakav model postanka ovih asteroida. Šovino i Farinella (Chauvineau & Farinella 1994) i Ričardson (Richardson 2001) koji su se u navedenim publikacijama bavili i ovim pitanjem, nisu došli ni do kakvih definitivnih zaključaka. Spektar mogućih objašnjenja je širok, i kreće se od neadekvatno zamišljene i implementirane simulacije, preko loših početnih uslova i kratkog intervala integracije, do složenijih teorijskih uzroka koji zadiru u poreklo asteroidnog pojasa i kosmogonske uticaje. Teorijski, uzrok usporavanja njihove rotacije može da bude sudar u kome biva izgubljen najveći deo momenta impulsa (npr. slučaj suprotnih smerova relativne brzine i rotacije), ali takvi sudari se u ovoj simulaciji nisu pokazali kao efikasni mehanizmi usporavanja rotacije. Međutim, postoje spekulacije (npr. Brunini 1998) o različitom poreklu (u kosmogonskom smislu) pojedinih grupa asteroida, među njima i sporih rotatora. Takođe postoji hipoteza (Ćirković, lična komunikacija) o kometskom poreklu ovakvih asteroida. U tom slučaju, značajan uticaj na njihovu fizičku i dinamičku (pa i orbitalnu) evoluciju ima i njihova kometska aktivnost, pre nego što postanu asteroidi. Fizičku evoluciju asteroida nastalih od komete Jupiterove familije proučavao je Solem (Solem 1995). Neki od njegovih rezultata takođe upućuju na ovakav zaključak. Konačno, s obzirom na specifične optičke karakteristike Tutatisa, kao najizrazitijeg sporog rotatora, mislimo da bi jedno od mogućih objašnjenja mogao biti i uticaj negravitacionih sila na vektor rotacije ovih objekata, a time posredno i na evoluciju i, na kraju, sudar komponenata dvojnog sistema od koga bi, po ovoj zamisli, bio formiran kontaktni spori rotator.

8.2 Perspektive budućih istraživanja na ovom polju

Kao što je naglašeno u prvom odeljku, poznavanje asteroida na posredan način doprinosi poznavanju dugoročne evolucije Sunčevog sistema. Zbog toga je proučavanje ovih objekata jedno od aktuelnijih polja planetarne astronomije. Ovde će biti date samo neke ideje u vezi sa daljim istraživanjima tematike ovog rada.

Najvažniji napredak ovakvih simulacija bio bi realniji model asteroida, koji bi uključio uticaje gravitacije i kohezionih sila u skladu sa dosadašnjim poznavanjem (ili nepoznavanjem) strukture asteroida. Ulogu trenja i fraktura takođe treba razjasniti. Neke od pomenutih referenci pokrenule su neka od navedenih pitanja, ali smo od potpunog poznavanja geofizičkih karakteristika asteroida još daleko.

Jedan od faktora koji nisu uključeni u ovo istraživanje, niti su do sada sistematski obrađivani, je i uticaj negravitacionih sila na vektore rotacije

asteroida. Iako se svakako ne radi o posebno važnim efektima, na velikoj vremenskoj skali oni bi mogli bitno da utiču na raspodelu vektora rotacije, a posredno možda i na evoluciju dvojnih sistema (v. prethodni pododjeljak). Klasični negravitacioni efekti takođe su možda potcenjeni u ovoj simulaciji, i zaslužuju detaljniju obradu.

Povezivanje hemijskog sastava i, u vezi sa tim, taksonomske klasifikacije asteroida, sa orbitalnom i fizičkom evolucijom je veoma važan zadatak ovakvih istraživanja u budućnosti, ali će ovakve studije u velikoj meri zavisiti i od posmatračkog materijala i rezultata planiranih misija na asteroide. S obzirom na oskudnost posmatračkih modela asteroida, a naročito dvojnih, poređenje rezultata simulacija sa posmatračkim podacima još nema veliki značaj, ali će sa porastom posmatračkih modela asteroida verovatno postati jedan od najvažnijih testova simulacija i njihovih rezultata. Konačno, iako rezultati ovog rada ne idu u prilog hipotezama o kosmogonskim uticajima na udeo dvojnih asteroida, ovakvi uticaji se ipak ne mogu sasvim odbaciti bez detaljnijeg ispitivanja.

9. Zaključak

Izvršena je kvalitativna simulacija svih aspekata migracije asteroida iz glavnog pojasa u pojas NEA i njihove kratkoročne evolucije u tom pojasu, što je omogućilo proučavanje sudara i plimskih raspada sa realnijim početnim uslovima i jasnije sagledavanje povezanosti orbitalne i fizičke evolucije asteroida, u poređenju sa izolovanim simulacijama sudara i raspada. Potvrđena je povezanost procesa formiranja dvojnih sistema sa njihovom orbitalnom evolucijom, pa se ne ukazuje potreba za kosmogonskim objašnjenjima većeg broja posmatranih dvojnih asteroida u pojasu NEA.

Uočeno je formiranje nekoliko tipičnih proizvoda plimske i sudarne evolucije: razdvojenih dvojnih sistema, kontaktnih dvojnih sistema, brzih rotatora i asteroida sa satelitima. Na osnovu toka simulacije razvijeni su, po našem mišljenju, zadovoljavajuće robusni i opšti modeli formiranja ovih objekata. Asteroidi sa satelitima i brzi rotatori formiraju se pri sudarima, pri čemu prvi nastaju pri sudaru asteroida čije se mase bitno razlikuju, dok drugi nastaju pri sudarima asteroida uporedivih masa, ukoliko se steknu i drugi uslovi (ugao sudara, orijentacija vektora rotacije). Razdvojeni dvojni sistemi su proizvod plimske evolucije. Kontaktni dvojni sistemi nastaju ili zbog plimskih sila, ili evolucijom razdvojenih dvojnih asteroida. Izrazito spori rotatori, kako pojedinačni tako i kontaktni dvojni, nisu detektovani, što može biti povezano sa specifičnim poreklom i/ili ranom evolucijom ovih objekata, ali i sa nedostacima simulacije.

Plimske sile su se, uopšteno govoreći, pokazale kao važniji faktor evolucije od sudara, verovatno zbog veće izloženosti asteroida njihovom dejstvu i neprestanog delovanja, mada se ni ovde ne može isključiti uticaj sistematskih grešaka simulacije. Stabilnost gravitaciono vezanih agregata

čak i na maloj masenoj skali je potvrđena, što je u skladu sa mnogim novijim istraživanjima.

Zapaženo je formiranje većeg broja malih fragmenata u orbitama pojasa ECA, što objašnjava veći broj malih objekata u ovom regionu nego što daju teorijska predviđanja koja ne uzimaju u obzir sudare/raspade. Stalno stvaranje ovakvih objekata takođe pojašnjava postojanje stacionarnog stanja u pojasu NEA (u kombinaciji sa stalnim prilivom asteroida iz glavnog pojasa).

Mnoga pitanja ipak ostaju otvorena. Među njima su poreklo sporih rotatora, uticaj trenja i fraktura, stvarna uloga kohezivnih sila, uticaj optičkih karakteristika površine na fizičku evoluciju, itd. Neophodna su dalja istraživanja ovih pitanja, kako teorijska, tako i numerička.

Zahvalnost. Veoma sam zahvalan Zoranu Kneževiću (Astronomska opservatorija, Beograd) na korisnim savetima u vezi sa integracijom orbita i negravitacionih efekata, kao i na obezbeđenoj literaturi Benz & Asphaug 1999. Takođe se zahvaljujem Tomasu Arensu (Thomas J. Ahrens, Seismological Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena) na obezbeđenoj literaturi Love & Ahrens, 1996a. Dragocenu pomoć u vezi sa hidrodinamičkim modeliranjem asteroida pružio mi je Viljem Botke (William F. Bottke, Department for Space Studies, Southwest Research Institute, Boulder). Milanu Ćirkoviću (Astronomska opservatorija, Beograd) dugujem zahvalnost za zanimljive sugestije u vezi sa poreklom sporih rotatora. Konačno, zahvaljujem se Igoru Smoliću, rukovodiocu seminara Astronomije (Istraživačka Stanica Petnica, Valjevo) na pokazanom strpljenju i dozvoli da rad na ovom projektu traje znatno duže nego što uobičajeni rokovi dozvoljavaju.

Najveći deo literature preuzet je iz elektronskih arhiva NASA Astrophysics Data System (adsabs.harvard.edu) i Los Alamos Preprint Archive (xxx.lanl.gov), koje svakako spadaju među najkorisnije i najopremljenije on-line arhive.

Literatura

- Benz W., Asphaug E. 1999. *Icarus*, **142**: 5.
- Boss A. P., 1996. *ApJ*, **469**: 906.
- Bottke *et al.* 2002. *Icarus*, **156**: 399
- Breiter S., Jackson A. A. 1998. *MNRAS*, **299**: 237.
- Brunini A. 1994. *A&A*, **289**: 637.
- Brunini A. 1998. *MNRAS*, **293**: 405.

- Chauvineau B., Farinella P. 1994. ASP Conference Series, **63**: 214.
- Duncan M.J., Levison H. F., Lee M. H., 1998. *AJ*, **116**: 2067.
- Duncan M.J., Quinn T. 1993. *ARAA*, **31**: 265.
- Efroimsky M. 2001. *P&SS*, **49**: 937.
- Farinella P., Chauvineau B., 1993. *A&A*, **279**: 251.
- Farinella *et al.* 1992. *A&A*, **253**: 604.
- Farinella P., Paolicchi P., Zappal V. 1981. *A&A*, **104**: 159.
- Franklin F., Lecar M., Murison M. 1993. *AJ*, **105**: 2336.
- Gomes R. S. 1997. *AJ*, **114**: 396.
- Habib S., Ryne R.D. 1994. preprint.
- Harris A.W., 1996. *LPSC*, XXVII: 977.
- Harris N.W., Bailey M.E. 1998. *MNRAS*, **297**: 1227.
- Hasegawa M., Nakazawa K. 1990. *A&A*, **227**: 619.
- Hernquist L., Katz N. 1989. *ApJS*, **70**: 419.
- Holman M., Wisdom J. 1993. *AJ*, **105**: 1987.
- Lagerkvist *et al.* 2002 Uppsala photometric catalogue of asteroids.
www.astro.uu.se
- Lecar M., Franklin F., Murison M. 1992. *AJ*, **104**: 1230.
- Leinhardt Z.M., Richardson D.C., Quinn T. 2000. *Icarus*, **146**: 133.
- Love S.G., Ahrens T.J. 1996a. *Icarus*, **124**: 141.
- Love S.G., Ahrens T.J. 1996b. *Bulletin of the American Astronomical Society*, **28**: 1102.
- Margot *et al.* 2002. *Scienceexpress*, **294**: 1.
- Michel P., Froeschl Ch. 2000. *CeMDA*, **78**: 93.
- Michel *et al.* 2002. Submitted to *Icarus*
- Monaghan J.J. 1992. *ARAA*, **30**: 543.
- Murison M., Lecar M., Franklin F. 1994. *AJ*, **108**: 2323.
- Nakazawa K., Ida S., Nakagawa Y. 1989a. *A&A*, **220**: 293.
- Nakazawa K., Ida S., Nakagawa Y. 1989b. *A&A*, **221**: 342.
- Olsson-Steel D. 1987. *MNRAS*, **226**: 1.
- Peale S.J., 1999. *ARAA*, **37**: 533.
- Press *et al.* 1997. *Numerical Recipes in C*. Cambridge University Press
- Solar System Dynamics Group – Fundamental Constants. 2001.
ssd.jpl.nasa.gov.
- Rabinowitz D.L. 1993. *ApJ*, **407**: 412.
- Rabinowitz D.L. 1997. *Icarus*, **130**: 287.
- Richardson D.C. 2001. *American Astronomical Society Meeting*, **199**: 28.01.
- Richardson D.C., Bottke W. F., Love S. G. 1998. *Icarus*, **134**: 47.
- Richardson D.C., Bottke W. F. 1996. *DPS meeting*, **28**: 10.33.

- Saha P., Tremaine S. 1992. *AJ*, **104**: 1633.
Saha P., Tremaine S. 1994. *AJ*, **108**: 1962.
Solem J. 1995. *A&A*, **302**: 596.
Solem J., Hills J. G. 1996. *AJ*, **111**: 1382.
Steel D.I., Baggaley W.J. 1985. *MNRAS*, **212**: 817.
Vokrouhlick D. 1999. *A&A*, **344**: 362.
Vokrouhlick D., Brož M. 1999. *A&A*, **350**: 1079.
Wisdom J., Holman M. 1991. *AJ*, **102**: 1528.
Wisdom J., Holman M. 1992. *AJ*, **104**: 2022.

Mihailo Čubrović

Evolution of Binary Near Earth Asteroids I. Interrelation of Binary Nature and Physical Properties with Orbital Evolution

This is the first in a series of papers intended to cover various aspects of the evolution of binary Near Earth Asteroids by the means of numerical simulations. In this paper the existence of a connection between binary nature (and the physical characteristics) of asteroids and their orbital evolution was checked. The main hypothesis, obtained from the observations, is that the Near Earth Asteroid population contains considerably higher percent of binaries compared to the Main Belt. Typical evolution paths for different types (in the sense of physical properties) of binary Near Earth Asteroids were also explored, as well as distribution of these types among different areas in the space of orbital elements. The simulation covered simultaneously both orbital evolution and evolution of physical properties. Orbital evolution was simulated using a second-order symplectic integrator based on the classical concept of mixed variables (MVS) and optimized for close approaches. Dynamic perturbations of binary systems, as well as the Yarkovsky force were introduced in a semianalytical way. Physical evolution due to tidal forces and collision/disruption events was described with a new model, which combines N-body integration and Smoothed Particle Hydrodynamics calculations. The results show the typical evolution paths of some Near Earth Asteroids: contact binaries, separated binaries, asteroids with a satellite, fast rotators. Slow rotators (like Toutatis) have not been detected. A possible explanation is the specific (possibly cometary) cosmogonic origin of these objects, as well as strong non-gravitational influences, but other explanations also cannot be discarded. We must stress that short interval of integration and small number of particles make these conclusions uncertain.

