

## Kozai mehanizam u višeplanetarnim ekstrasolarnim sistemima

*Ako se planeta nalazi u orbiti oko zvezde koja ima udaljenog zvezdanog pratioca, privlačna sila druge zvezde može da perturbuje planetarnu orbitu kroz rezonantan efekat poznat kao Kozai mehanizam. Kozai mehanizam je interesantan kao jedno od mogućih objašnjenja za velike ekscentričnosti orbita ekstrasolarnih planeta i, uz plimske sile, mogući uzrok za migraciju gasovitih džinova na bliske orbite. U radu je numerčkim simulacijama testirana mogućnost da Kozai mehanizam bude supresovan u sistemima sa više planeta. Simuliran je sistem sa planetama mase Jupitera i Saturna u orbiti oko zvezde mase Sunca i varirani parametri sistema. Rezultati ukazuju da Kozai mehanizam može da se ispolji i pored međuplanetanih interakcija poput onih u Sunčevom sistemu, ali je primećena velika osetljivost na povećanje poluose dvojnog zvezdanog sistema. Razmatrana je mogućnost provere ovih zaključaka kroz analizu poznate populacije planeta u dvojnim sistemima.*

### Uvod

Od 252 poznatih ekstrasolarnih planetarnih sistema, 43 su u orbiti oko zvezda koje su članovi dvojnih sistema. S obzirom na teškoće pri detekciji tamnih pratioca ovaj broj je verovatno veći (Mugrauer *et al.* 2009). Poznata populacija planeta u širokim dvojnim sistemima češće sadrži supermasivne planete (preko 2 Mj) u bliskim orbitama nego generalna populacije ekstrasolarnih planeta (Eggenberger *et al.* 2004; Desidera i Barbieri 2008).

Kada matična zvezda neke ekstrasolarne planete ima udaljenog zvezdanog pratioca, druga zvezda mo-

že da perturbira planetarnu orbitu kroz rezonantni efekat poznat kao Kozai mehanizam (Kozai 1962). Efekat se javlja ako je planetarni sistem inklinisan u odnosu na ravan dvojnog zvezdanog sistema. Tada gravitaciona sila pratioca matične zvezde teži da privuče orbitu planete na zajedničku ravan, a pri tome se povećava ekscentričnost planetarne orbite. Kao rezultat, planeta upada u oscilaciju između faza velike inklinacije i velike ekscentričnosti orbite. Bitna odlika ovog procesa je da amplitudna ekscentričnost zavisi jedino od početne relativne inklinacije orbita:

$$e_{\max} = \sqrt{1 - \frac{5}{3} \cdot (\cos^2 i_0)} \quad (1)$$

gde je  $e_{\max}$  maksimalna ekscentričnost koju planeta može da dostigne pri Kozai mehanizmu, a  $i_0$  početna relativna inklinacija ravni planetarnog sistema u odnosu na ravan zvezdanog sistema.

Prema izrazu (1) uslovi za početak Kozai mehanizma postoje samo kada je početna relativna inklinacija orbita veća od određene granice ( $i_0 > 39^\circ$ ). Uzevši da su ravni planetarnih sistema kod širokih dvojnih sistema slobodno orijentisane i ne zavise od ravni dvojnog zvezdanog sistema, uslov bi zadovoljilo preko tri četvrtine planeta u širokim dvojnim sistemima. Mase planete i zvezda, parametri planetarne orbite i orbite dvojnog zvezdanog sistema utiču na period procesa:

$$P_{\text{Koz}} = P_1 \cdot \frac{m_1 + m_2}{m_3} \cdot \left(\frac{a_2}{a_1}\right)^3 \cdot (1 - e_2^2)^{3/2} \quad (2)$$

gde je  $P_{\text{Koz}}$  period oscilacije između ekscentričnosti i inklinacije,  $P_1$  period orbite planete,  $m_1$ ,  $m_2$  i  $m_3$  redom mase planete, matične zvezde i zvezdanog pratioca;  $a_2$  i  $e_2$  su orbitalni parametri dvojnog sistema, a  $a_1$  velika poluosa orbite planete.

Kozai mehanizam je interesantan kao jedno od mogućih objašnjenja za velike ekscentričnosti orbita ekstrasolarnih planeta (npr. Takeda i Rasio 2005) i kao mogući uzrok za migraciju gasovitih džinova

na vrelu orbite. Prema predloženoj teoriji Kozai migracije, gravitaciona sila druge zvezde bi dovela orbitu planete u stanje velike ekscentričnosti, nakon čega bi plimske sile matične zvezde usporavale planetu do dostizanja planetarne orbite manje ekscentričnosti sa zadržanim periastronom (Fabrycky i Tremaine 2006). Ograničavajuća okolnost za ovaj scenario migracije ekstrasolarnih planeta je što je Kozai mehanizam veoma osetljiv na postojanje ostalih perturbacija u sistemu.

U rada je numeričkim simulacijama testirana mogućnost da Kozai mehanizam supresuju međuplanetarne interakcije ako u sistemu postoje više od jednog gasovitog džina. Nije sasvim jasno u kojim granicama parametra sistema (masa i udaljenost druge zvezde, orbite i mase planeta) je moguć Kozai mehanizam u višeplanetarnim sistemima. Ideja je da se obris ovog parametarskog prostora traži simulacijom planetarnog sistema u širokom dvojnog sistema sa setom različitih početnih parametrima. Dobijene rezultate je moguće analizirati u kontekstu razlike između populacije planeta u širokim dvojnim sistemima i generalne populacije ekstrasolarnih planeta.

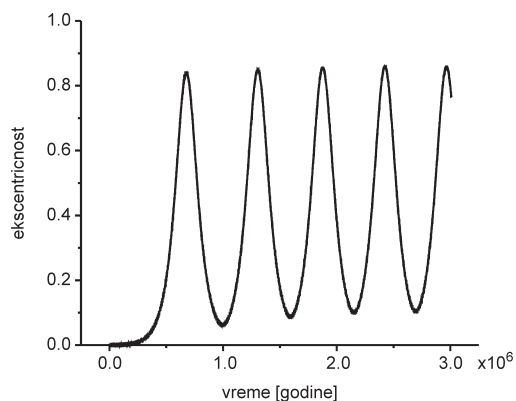
## Metod

### Simulacije

U programskom jeziku C napisan je program za rešavanje problema N-tela metodom Runge-Kutta stepena 4. Maksimalni i početni vremenski korak simulacije je 8 dana i u svakoj iteraciji se koriguje u odnosu na trenutno najmanje rastojanje dva tela, sa ciljem da se održi ukupan nivo energije sistema uz najmanji moguć gubitak procesorskog vremena. Dostignuta preciznost je bila takva da su trendovi promene energije tokom cele simulacije manji od milionitog dela početne energije za 108 godina.

Na slici 1 prikazana je evolucija orbitalnih elemenata planete mase Jupitera u orbiti oko zvezde mase Sunca pod uticajem dvojnog protioaca mase 0.5  $M_{\text{Sol}}$  koji se nalazi na udaljenosti od 200 AU. Planeta prolazi kroz sekularnu Kozai oscilaciju. Numerička simulacije se slaže sa analitičkim rešenjem problema (jednačine 1 i 2).

U slučaju višeplanetarnog sistema, numeričke simulacije ukazuju na postojanje dva moguća ishoda: kada su međuplanetarne interakcije jake, uticaj druge zvezde je prigušen i planete stupaju u stabilno stanje sa manjom amplitudnom ekscentričnošću. U slučaju



Slika 1. Precesija orbite usamljenog Jupitera pod uticajem zvezdanog pratioca udaljenog  $a_{\text{bin}} = 250$  AU. Početna relativna inklinacija dvojnog i planetarnog sistema je  $i_0 = 65^\circ$ .

Figure 1. Orbital precession of a lone Jupiter under gravitational pull of a secondary star, distance  $a_{\text{bin}} = 250$  AU. Initial relative inclination of planetary and binary system is  $i_0 = 65^\circ$ .

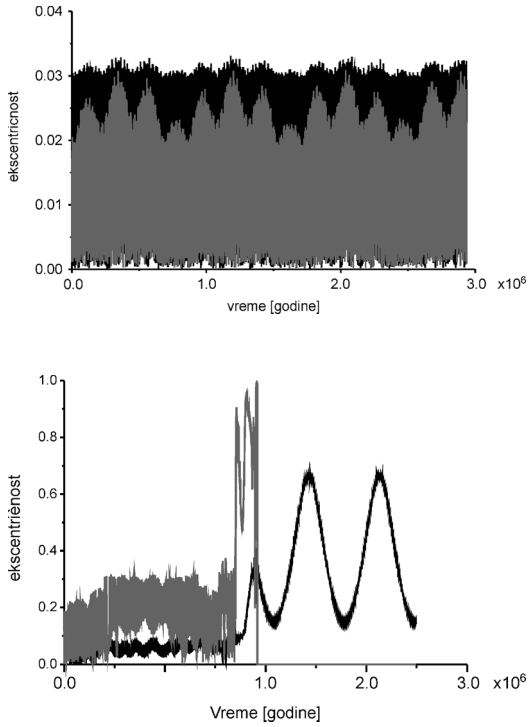
da prevlada uticaj druge zvezde, posle određenog vremena nestabilnosti dolazi do ekscitacije spoljašnje planete, dok unutrašnja planeta dostiže visoke ekscentričnosti. Primeri ovakvih ishoda su prikazani na slici 2.

### Postavka modela

Postavljen je model planetarnog sistema sa dve planete u orbiti oko zvezde sa dvojnim pratiocem. Varirana su velika poluosa  $a_{\text{pl}}$  druge planete, početna relativna inklinacija  $i_0$  i velika poluosa dvojnog zvezdanog sistema  $a_{\text{bin}}$ . U svakoj simulaciji je uzeta maksimalna dostignuta ekscentričnost spoljne planete kao indikator uticaja Kozai rezonanse za date parametre.

Za matičnu zvezdu je izabrana zvezda Sunčevog tipa, što odgovara većini trenutno poznatih matičnih zvezda planetarnih sistema. Pretpostavljeno je da je planeta mase Jupitera formirana na rastojanju od 5 AU, dok je druga planete mase  $m_{\text{pl}} = 0.3$  Mj formirana na udaljenosti koja je varirana od  $a_{\text{pl}} = 8$  AU do  $a_{\text{pl}} = 12.5$  AU.

Masa druge zvezde u sistemu, ekscentričnost i poluosa orbite dvojnog sistema zajedno konfiguriraju u periodu Kozai precesije:



Slika 2. Precesija ekscentričnosti djevu planeta masa Jupitera i Saturna u slučaju dvojnog pratioca mase  $0.5 M_{\text{Sol}}$  na udaljenosti od 200 AU. Početna relativna inklinacija je  $i_0 = 65^\circ$  a ekscentričnost dvojnog sistema  $e = 0.4$  (gore). U slučaju da je udaljenost druge zvезде 100 AU nakon određenog vremena dolazi do nestabilnosti i ekscitacije Saturna iz orbite (dole).

Figure 2. Eccentricity precession of Jupiter and Saturn-mass planets in case of a  $0.5 M_{\text{Sol}}$  secondary star at distance of 200 AU. Initial relative inclination is  $i_0 = 65^\circ$  and eccentricity of the binary star orbit is  $e = 0.4$  (top). In case of a 100 AU secondary, instability emerges in the system, which results with an excitation of the outer planet (bottom).

$$P_{\text{Koz}} \propto a_s^3 \frac{(1 - e^2)^{3/2}}{m} \quad (3)$$

Što je period Kozai precესije  $P_{\text{Koz}}$  duži to je lakše da se njen uticaj supresuje međuplanetarnim interakcijama. S obzirom da je  $P_{\text{Koz}}$  proporcionalan sa kubom velike poluose dvojnog sistema  $a_{\text{bin}}$  i s obzirom na širinu raspodele koja se kreće od nekoliko desetina do nekoliko hiljada astronomskih jedinica,  $a_{\text{bin}}$  ima najveći uticaj na period Kozai efekta, pa

time i na stabilnost planetarnog sistema. U našem modelu masa zvezdanog pratioca i ekscentričnost dvojnog sistema držane su istim u svim simulacijama, a varirana je velika poluosa zvezdanog sistema  $a_{\text{bin}}$ . Za masu pratioca matične zvezde uzeto je  $m_2 = 0.5 M_{\text{Sol}}$ , jer su dvojni pratioci matičnih zvezda većinom tamniji patuljci (Mugrauer *et al.* 2007), a za ekscentričnost orbite dvojnog sistema je uzeta vrednost  $e_{\text{bin}} = 0.4$ .

Nije detaljnije simuliran slučaj sa tri ili više planeta istog reda mase jer se u datom slučaju javlja brza faza haotičnih međuplanetarnih interakcija do dostizanja stabilnog stanja sa preostale dve planete na ekscentričnim orbitama (Nagasawa *et al.* 2008; Juric i Tremaine 2008). U našim probnim simulacijama sistema sa tri gasovita džina, međuplanetarne ekscitacije su se odigrale za vremenski period manji od 106 godina, što je mnogo kraći period od jedne Kozai oscilacije, te ovaj proces ne zavisi od drugog člana širokog dvojnog sistema.

## Rezultati i diskusija

Većina procesorskog vremena je posvećena slučajevima kada je separacija dvojnog sistema između 150 i 300 astronomskih jedinica. U tabeli 1 su predstavljeni rezultati numeričkih simulacija pri poluosama dvojnih sistema od 150, 200 i 300 AU. U slučaju stabilnih sistema istaknuta je maksimalna dostignuta ekscentričnost spoljne planete (što je ono veća planeta je bliža ekscitaciji).

Kozai mehanizam se gotovo uvek ispoljava kada je separacija  $a_{\text{bin}} = 100$  AU ili manje. Simulacije ukazuju da za ove dvojne sisteme međuplanetarne interakcije ne sprečavaju Kozai mehanizam ni pri relativnim inklinacijama na granici kritične Kozai inklinacije  $i_0 \sim 39^\circ$ . Sa druge strane, u veoma širokim dvojnim sistemima sa  $a_{\text{bin}} > 300$  AU uticaj zvezde brzo opada. Tada Kozai mehanizam mogu da spreče dodatne planete skromnih masa, čak i pri relativnim inklinacijama od  $85^\circ$  i velikoj ekscentričnosti dvojnog sistema (koja smanjuje  $P_{\text{Koz}}$  prema izrazu 2).

Već pri  $a_{\text{bin}} = 300$  AU planetarna interakcija Saturna i Jupitera je sprečila ekscitaciju i razvoj ekscentričnosti pri svim vrednostima velike poluose druge planete i početne inklinacije. Razlika između maksimalnih dostignutih ekscentričnosti pri  $a_{\text{bin}} = 200$  AU i  $a_{\text{bin}} = 300$  AU prikazana je na slici 3.

Tabela 1. Rezultati simulacija za 45 skupova parametara. Varirani su poluosa dvojnog zvezdanog sistema, poluosa spoljne planete i relativna inklinacija. Brojevi predstavljaju maksimalnu dostignutu ekscentričnost pri precesiji (vidi sliku 2, gore). Ova vrednost je korisna za opisivanje trenda uticaja pojedinih parametara na Kozai mehanizam, kao što je to prikazano na slici 3.

$a_{pl}$ [AU]	$a_{bin}$ [AU]			$i_0 = 65^\circ$			$i_0 = 85^\circ$		
	$i_0 = 45^\circ$								
	150	200	300	150	200	300	150	200	300
8.5	0.022	0.011	0.0066	0.3031	0.0213	0.0085	ekscitacija	0.0113	0.0081
10	0.086	0.016	0.0065	ekscitacija	0.1250	0.0081	ekscitacija	0.3613	0.0066
11	ekscitacija	0.03	0.0078	ekscitacija	ekscitacija	0.0117	ekscitacija	ekscitacija	0.0076
11.5	ekscitacija	0.054	0.0091	ekscitacija	ekscitacija	0.0155	ekscitacija	ekscitacija	0.0089
12.5	ekscitacija	0.1063	0.0124	ekscitacija	ekscitacija	0.0351	ekscitacija	ekscitacija	0.1177

Očekuje se da se veća učestalost Kozai mehanizma u populaciji planeta sa  $a_{bin} < 150$  AU manifestuje kroz veći broj vreljih Jupitera i planeta na ekscentričnim orbitama od generalne populacije ekstrasolarnih planeta, dok bi ova razlika bila daleko manje izražena kod dvojnih sistema sa porastom  $a_{bin}$  na više stotina astronomskih jedinica. Vredi napomenuti da bi druga zvezda tada i dalje mogla da utiče destabilišuće na

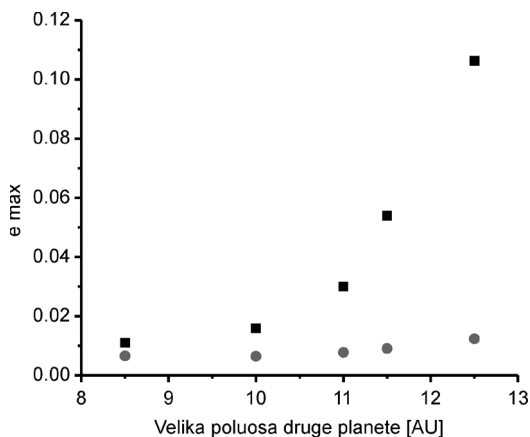
spoljne planete na pozicijama analognim Neptunu i Uranu u Sunčevom sistemu (Innanen *et al.* 1997).

### Slučaj HD 80606B

HD80606b (Naef *et al.* 2001) je jedan od najotiranijih slučajeva ekstrasolarnih planeta za koje se sumnja da su migrirale u trenutnu orbitu pod uticajem Kozai mehanizma i plimskih sila. Ekscentričnost orbite  $e = 0.93$ , je najveća među poznatim planetama a planeta je super džin sa minimalnom masom 4 Mj. Velika poluosa planete je  $a = 0.47$  AU. Matična zvezda HD80606 se nalazi u dvojnog sistema projektovane separacije  $r_{bin} = 1200$  AU, a mase obeju zvezda su približne masi Sunca. Da bi HD80606b mogla da migrira sa hipotetičke inicijalne cirkularne orbite od 5 AU na sadašnju orbitu, tj. da bi planeta došla do gotovo unitarne ekscentričnosti, koja bi kasnije plimnim silama bila relaksirana na sadašnjih  $e = 0.93$  (Wu i Murray 2003), početna relativna inklinacija planetarnog sistema bi morala da bude veća od  $85^\circ$ .

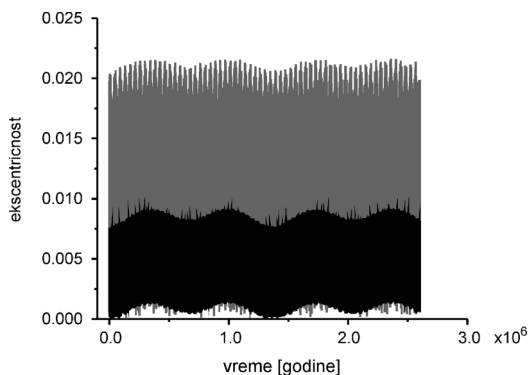
Otežavajuća okolnost je što bi Kozai efekat, usled velike separacije zvezda, imao veoma dugačak period (reda veličina 108 godina). Za uzetu vrednost velike poluose dvojnog sistema  $a_{bin} = 1200$  AU, Kozai mehanizam je lako nadjačan i planetom mase Neptuna ako je takva postojala u sistemu (slika 4). Ovo važi i pri ekstremnim vrednostima početne relativne inklinacije i ekscentričnosti dvojnog sistema.

Potrebno je ukazati da je poznata samo prividna separacija dvojnog sistema HD80606-HD80607, a ne i stvarna velika poluosa orbite, kao što je i slučaj sa većinom širokih dvojnih sistema. Ponovljene su si-



Slika 3. Crne kvadrati predstavljaju maksimalne dostignute ekscentričnosti spoljašnje planete kada je  $a_{bin} = 200$  AU i  $i_0 = 45^\circ$ , a sivi kružići kada je  $a_{bin} = 300$  AU i  $i_0 = 45^\circ$  (vidi tabelu 1).

Figure 3. Black points represent amplitude eccentricity of the outer planet with orbital parameters  $a_{bin} = 200$  AU and  $i_0 = 45^\circ$ , and the gray points with orbital parameters  $a_{bin} = 300$  AU and  $i_0 = 45^\circ$ .



Slika 4. Promene ekscentričnosti HD80606b (crne tačke) u slučaju da je pored HD80606b na 5 AU formirana i planeta mase Neptuna na 10 AU od matične zvezde

Figure 4. Eccentricity precession of HD80606b (black points) if . along with HD80606b in a 5AU orbit, a Neptun-mass planet formed in the system in a 10 AU orbit

mulacije pod pretpostavkom da orbita dvojnog sistema nije inklinisana u odnosu na nebesku ravan, te da su parametri orbite  $e_{bin} = 0.7$ ,  $a_{bin} = 685$  AU. Ni pri ponovljenim simulacijama nije došlo do značajnijeg rasta ekscentričnosti HD80606b, te se nameće zaključak da je Kozai migracija moguća jedino ukoliko u sistemu nije postojalo drugo masivnije telo, ili da je planeta migrirala na ekscentričnu orbitu nevezanim procesom a da je Kozai mehanizam doprineo daljem povećanju ekscentričnosti. Otkriće nove planete u orbiti oko HD80606 bi zasigurno osporilo hipotezu da je Kozai mehanizam bio uzročnik migracije na sadašnju ekscentričnu orbitu.

## Zaključak

Numeričkim simulacijama je utvrđeno da međuplanetarne interakcije mogu da supresuju Kozai mehanizam, dok pri jakom uticaju druge zvezde dolazi do haotičnog sistema sa ekscitacijama spoljnih planeta, što bi dozvolilo da preostala dominantna planeta pređe u stanje u Kozai oscilacije. Sa više desetina simulacija ispitano je dejstvo druge zvezde pri variranim inicijalnim parametrima sa ciljem da se dobije razgraničenje faznih prostora u kojima su ova dva scenarija verovatna.

Velika poluosa dvojnog sistema je bila dominantan faktor koji je odlučivao stabilnost sistema, zbog širine raspodele i zbog skaliranja perioda Kozai oscilacije sa  $a_{bin}^3$ . Predloženo je da su međuplanetarne interakcije razlog zašto Kozai mehanizam postaje irelevantan sa porastom velike poluose dvojnog sistema  $a_{bin}$  na više stotina astronomskih jedinica, što se naziralo statističkom analizom populacije (Desidera i Barbieri 2008). Populacija planeta u veoma širokim dvojnim sistemima bi prema ovim navodima bila slična generalnoj populaciji planeta.

Populacija planeta u dvojnim sistemima sa 50 AU  $< a_{bin} < 300$  AU bi kao posledica učestale Kozai migracije sadržala veći broj vrelih Jupitera i planeta na ekscentričnim orbitama od generalne populacije. Donja granica od 50 AU je uvedena zbog verovatnog poklapanja ravni dvojnog i planetarnog sistema kada je orbita dvojnog sistema nekoliko desetina astronomskih jedinica.

Od posebne važnosti je što Kozai migracija Jupitera, za razliku od alternativne teorije migracije planeta usled interakcije sa protoplanetarnim diskom, ne dozvoljava formiranje terestrijalnih planeta na stabilnim orbitama. Zbog učestalih ekscitacija, populacije podložne Kozai mehanizmu bi ostale negostoljubive za višeplanetarne sisteme. Nije još pronađen višeplanetarni sistem u širokom dvojnog sistemu sa 50 AU  $< a_{bin} < 300$  AU, ali biće potreban veći uzorak od 9 planetarnih sistema da bi se dobio statistički značajnija potvrda (Mugrauer *et al.* 2007).

## Literatura

- Desidera S., Barbieri M. 2004. Properties of planets in binary systems, The role of binary separation. *Astronomy & Astrophysics*, **462**: 345.
- Eggenberger A., Mayor M., Udry S. 2004. Extrasolar Planets in Double and Multiple Stellar Systems. *Astronomy & Astrophysics*, **417**: 353.
- Fabrycky D., Tremaine S. 2006. Shrinking Binary Orbits by Combintion of Kozai Mechanism and Tidal Friction. *Astrophysics Journal*, **669**: 1298.
- Innanen K. A., Zheng J. Q., Mikkola S., Valtonen M. J. 1997. The Kozai Mechanism and the Stability of Planetary Orbits in Binary Star Systems. *The Astronomical Journal*, **113**: 5.
- Juric M., Tremaine S. 2007. Dynamical origin of extrasolar planetary systems. *The Astrophysical Journal*, **686**: 603.

Kozai Y. 1962. Secular perturbations of asteroids with high inclination and eccentricity. *Astronomical Journal*, **67**: 591.

Mugrauer M., Neuhauser R., Mazeh T. 2007. The multiplicity of exoplanet host stars; Spectroscopic confirmation of the companions GJ 3021B and HD27442 B, one new planet host triple-star system, and global statistics, *Astronomy & Astrophysics*, **XII 469**: 2.

Mugrauer M., Neuhauser R. 2009. The multiplicity of exoplanet host stars; New low-mass stellar companions of the exoplanet host stars HD?125612 and HD?212301. *Astronomy & Astrophysics*, **494**: 373.

Nagasawa M., Ida S., Bessho T. 2008. Formation of Hot Planets by a combination of planet scattering, tidal circularization, and Kozai mechanism. *The Astrophysics Journal*, **678**: 498.

Naef D., Latham D. W., Mayor M. 2001. HD80606 b, a planet on an extremely elongated orbit. *Astronomy & Astrophysics*, **375**: 2.

Takeda G., Rasio F. 2005. High Orbital Eccentricities of Extrasolar Planets Induced by the Kozai Mechanism. *ApJ*, **627**: 1001.

Triard A. H. M. J., Cameron A. C., Queloz D., Anderson D. R., Gillon M., Hebb L., Hellier C., Loeillet B., Maxted P., Mayor M., Pepe F., Pollacco D., Ségransan D., Smalley B., Udry S., West R., Wheatley P. 2009. Spin-orbit angle measurements for six southern transiting planets? New insights into the dynamical origins of hot Jupiters. arXiv:1008.2353v1.

Wu Y., Murray N. 2003. Planet Migration and Binary Companions: The Case of HD 80606b. *ApJ*, **589**: 605.

---

Miša Jovanović

## Kozai Mechanism in Extrasolar Multi-Planetary Systems

When an extrasolar planet is in an orbit around a star which belongs to a stellar binary pair, the influence of the host star's stellar companion can lead to a secular oscillation of a planet's orbital inclination and eccentricity through a process known as the Kozai mechanism (Kozai 1962). The Kozai mechanism is attractive as an explanation for the origin of high eccentricities of extrasolar planets and, in combination with tidal forces, as one of the possible causes for the migration of planets to hot orbits. The possibility that the stellar companion's influence is suppressed by the presence of additional planets in the system is tested through numerical simulations. A model system with two massive planets on orbits around a Solar mass star with a sub-solar mass companion was set up, with varying values of initial relative inclination of planetary and binary orbit, the second planet's semi-major axis and stellar binary separation. Numerical simulations imply that the suppression of the companion's influence is expected in the large majority of cases with binary semi-major axis  $a_{\text{bin}} > 300$  AU, while in the range of approximately  $a_{\text{bin}} < 200$  AU the Kozai effect would occur frequently regardless of the presence of additional planets. The possibility that these results are connected with the known distribution of planets in binary systems is discussed.

